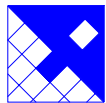




**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA HÍDRICA**



INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



FUNCATE - Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais



**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE
ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA
O NORDESTE SETENTRIONAL**

PROJETO BÁSICO

**TRECHO III – EIXO NORTE
R8 ESTUDOS HIDROLÓGICOS**



**TRECHO III – EIXO NORTE
R8 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL

PROJETO BÁSICO

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL

Ministro de Estado da Integração Nacional: **Ciro Ferreira Gomes**

Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica

Secretário de Infra-Estrutura Hídrica: **Hypérides Pereira de Macêdo**

Coordenador Geral: **João Urbano Cagnin**

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Diretor: **Luiz Carlos Moura Miranda**

FUNCATE – Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais

Gerente: **José Armando Varão Monteiro**

Coordenador Técnico: **Antônio Carlos de Almeida Vidon**

Coordenador Técnico Adjunto: **Ricardo Antônio Abrahão**

São José dos Campos, setembro de 2003

Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE

Projeto de transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional – Projeto Básico; Trecho III - Eixo Norte – R8 – Estudos Hidrológicos. - São José dos Campos: Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais – FUNCATE, 2003.

41 p

1. Transposição de Águas; Hidrologia.
- I. Trecho III – Eixo Norte – R8 – Estudos Hidrológicos.

CDU 556.18

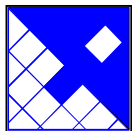
FUNCATE:

Av. Dr. João Guilhermino, 429, 11º Andar – Centro

São José dos Campos – SP

CEP: 12210-131

Telefone: (0XX 12) 3925 1399 Fax: (0XX 12) 3941 2829



FUNCATE

**Fundação de Ciência,
Aplicações e Tecnologia
Espaciais**

Projeto	RAA, RGV, LAVG	Data SET/2003
Verificação	RAA	Data SET/2003
Aprovação	ACAV	Data SET/2003
Aprovação	JAVM	Data SET/2003
Código FUNCATE	EN.B/III.RF.HI.0003	



MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL

Verificação		Data
Aprovação		Data

**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS
DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O
NORDESTE SETENTRIONAL**

PROJETO BÁSICO

**TRECHO III - EIXO NORTE
R8 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

**Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco
para o Nordeste Setentrional**
Projeto Básico

Equipe

José Armando Varão Monteiro: Gerente

Antônio Carlos de Almeida Vidon: Coordenador Técnico

Ricardo Antônio Abrahão: Coordenador Técnico Adjunto

Geverson Luiz Machado: Chefe da Equipe de Geotecnia
Clóvis Ribeiro de Moraes Leme: Engenheiro

Aloysio Accioly de Senna Filho: Chefe da Equipe de Geologia

Rafael Guedes Valença: Chefe da Equipe de Hidráulica
Anibal Young Eléspuru: Engenheiro

José Carlos Degaspare: Chefe da Equipe de Estrutura

José Ricardo Junqueira do Val: Chefe da Equipe de Orçamento e Planejamento

Bernd Dieter Lukas: Chefe da Equipe de Engenharia Mecânica

Sidnei Collange: Chefe da Equipe de Engenharia Elétrica

Equipe de Produção

Antonio Carlos Cunha Aguiar – Projetista

Antonio Muniz Neto – Projetista

Leandro Eboli – Projetista

João Luiz Bosso – Projetista

Laryssa Lillian Lopes – Técnica em Geoprocessamento

Mônica de Lourdes Sampaio – Desenhista Projetista

Infra Estrutura e Apoio

Ana Julia Cristofani Belli – Secretária

Célia Regina Pandolphi Pereira – Assistente Adm. Especializada

Andréa Marques Moraes – Aux. Administrativo

Maria Aparecida de Souza – Servente

Consultor

Luiz Antonio Villaça de Garcia



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

APRESENTAÇÃO

O presente documento se constitui no Relatório R8 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS, parte integrante do **Projeto Básico do Trecho III – Eixo Norte**, referente ao PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL, elaborado pela FUNCATE através do contrato INPE/FUNCATE nº 01.06.094.0/99.

O Projeto de Transposição está sendo desenvolvido com base no Convênio nº 06/97-MPO/SEPPE – celebrado entre o MINISTÉRIO DE INTEGRAÇÃO NACIONAL-MI e o MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-MCT e seu INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE.

O **Projeto Básico do Trecho III – Eixo Norte** compõe-se dos seguintes relatórios:

- R1 Descrição do Projeto
- R2 Critérios de Projeto
- R3 Usinas Hidrelétricas
- R4 Sistema Adutor
- R5 Sistema de Drenagem
- R6 Bases Cartográficas
- R7 Geologia e Geotecnia
- R8 Estudos Hidrológicos
- R9 Sistema de Supervisão
- R10 Modelo Hidrodinâmico e Esquema Operacional
- R11 Sistema Elétrico
- R12 Canteiros e Sistema Viário
- R13 Cronograma e Orçamentos
- R14 Dossiê de Licitação
- R15 Memoriais de Cálculo
- R16 Linhas de Transmissão
- R17 Caderno de Desenhos



ÍNDICE	PG.
1 . OBJETO E OBJETIVO.....	1
2 . INTRODUÇÃO.....	1
3 . ESTUDOS HIDROLÓGICOS	1
4 . METODOLOGIA.....	2
4.1 Estruturas de Drenagem	2
4.2 Aquedutos e Vertedouros das Barragens	3
5 . ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE CHUVAS MÁXIMAS	3
5.1 Seleção dos Postos Pluviométricos de Interesse	3
5.2 Definição das Séries de Totais Precipitados.....	4
5.3 Ajustes das Distribuições Probabilísticas às Séries de Chuvas Máximas	4
5.4 Precipitações Máximas para os Postos Pluviométricos Representativos	5
5.5 Relação Intensidade-Duração e Frequência (IDF) para os Postos Representativos.....	7
6 . DEFINIÇÃO DAS CHUVAS DE PROJETO	9
6.1 Duração das Chuvas de Projeto.....	9
6.2 Fator de Redução de Área.....	9
6.3 Distribuição Temporal das Chuvas de Projeto	9
7 . MODELAGEM DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO	10
7.1 Método do Hidrograma Unitário	10
8 . SIMULAÇÕES E RESULTADOS	10
9 . ESTUDOS ENERGÉTICOS	13
9.1 Diretrizes do Estudo	13
9.2 Metodologia.....	13
9.3 Determinação da Potência Instalada.....	15
9.3.1 Modelagem do Sistema e das Usinas Hidrelétricas	15
9.3.2 Simulações do Sistema sem Limitações de Potência Instalada	16
9.3.3 Simulações do Sistema com as Potências Instaladas Definidas.....	25
9.4 Definição da Potência Instalada e Modulação das Usinas	31
9.4.1 Metodologia.....	31
9.4.2 Análise da Modulação Fixa	33
9.4.3 Determinação da Modulação Ótima	34
9.5 Balanço Energético	36
10 . CONSIDERAÇÕES FINAIS	38



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

11 . REFERÊNCIAS	40
------------------------	----



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

1 . OBJETO E OBJETIVO

O objeto deste relatório é o Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional e seu objetivo a complementação dos estudos hidrológicos e energéticos desenvolvidos na primeira fase do Projeto Básico do Trecho II e reanalisar os estudos energéticos desenvolvidos na fase de estudos de Viabilidade.

2 . INTRODUÇÃO

Estes estudos complementam aqueles desenvolvidos na fase anterior de Projeto Básico, como consta do relatório EN.B/II.RF.HI.0002 de abril de 2001, no que diz respeito aos hidrogramas de cheias utilizados no dimensionamento de reservatórios e vertedores.

Além disso, ampliou-se o conceito de geração de energia ao longo do traçado de adução das águas transpostas, originando estudos energéticos adicionais. Assim, avaliando-se o gerenciamento nacional dos recursos hídricos que originam a geração de energia elétrica, abrangendo desde o cenário atual até o futuro de longo prazo, verificou-se que a implantação de sistemas de consumo de altas cargas com uso intensivo em épocas de seca, que é o caso da Transposição do rio São Francisco, será um condicionante importante no planejamento da ampliação dos sistemas de geração e distribuição e na determinação da evolução das tarifas de energia correspondentes.

Por isso, visando minimizar tal influência, buscou-se alternativas de traçado, cuja configuração topográfica permitisse a introdução de usinas hidrelétricas adicionais, considerando-se o investimento dessas usinas como parte do sistema de transposição, e a energia gerada como custo evitado no consumo para o bombeamento. Dessa forma, o custo operacional deverá baixar significativamente, aumentando a sustentabilidade do sistema, além de minimizar o impacto na carga elétrica da região Nordeste e, dentro do possível, minorar a dependência de suprimento energético.

3 . ESTUDOS HIDROLÓGICOS

O objetivo principal deste estudo é determinar os hidrogramas e as vazões de projeto dos aquedutos, das estruturas de drenagem e dos extravasores das barragens que compõem o sistema de adução do Trecho II do projeto de transposição do rio São Francisco (TRSF).

Os principais condicionantes deste estudo são:

- não há disponibilidade de séries de vazões médias diárias longas, representativas e confiáveis para o desenvolvimento de análise de frequência de vazões máximas para determinação dos hidrogramas de projeto;
- os hidrogramas de projeto serão determinados supondo que, no instante inicial, o NA no canal corresponda ao NA máximo normal de projeto. Assim, os hidrogramas deverão ser definidos de forma a resultarem em vazões de pico extremas que garantam a segurança da obra;
- o hidrograma efluente do extravasor da estrutura hidráulica da bacia hidrográfica de Caiçara foi obtido através da propagação dos hidrogramas afluentes nos reservatórios, considerando as diversas alternativas para as estruturas hidráulicas, concebidas no âmbito do projeto hidráulico.

Os critérios estabelecidos para a determinação das vazões e hidrogramas de projeto das estruturas são:

- dimensionamento dos aquedutos e dos extravasores das barragens, com vistas à formação dos reservatórios de regularização ou à travessia dos talwegues;
- para pequenas e médias barragens o dimensionamento para o hidrograma de projeto se rá feito com período de retorno de 500 anos e a verificação da borda livre para o hidrograma de projeto de 1.000 anos;



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

- grandes barragens e aquedutos: dimensionamento para o hidrograma de projeto com período de retorno de 1.000 anos.
- obras de drenagem deverão ser dimensionadas para o hidrograma resultante de uma tormenta com período de retorno de 100 anos, em condições críticas de distribuição temporal e espacial da chuva.

4 . METODOLOGIA

A metodologia estabelecida para a determinação da vazão de projeto das obras de drenagem foi definida em função da área de drenagem da bacia hidrográfica. Em princípio, as vazões de projeto das obras de drenagem serão determinadas pelo método racional para bacias hidrográficas com áreas de drenagem até 3,5 km². Para as demais bacias hidrográficas, a vazão de projeto corresponderá à vazão de pico do hidrograma resultante da utilização de métodos baseados na teoria do hidrograma unitário (por exemplo, do “Soil Conservation Service”(SCS)), considerando as características fisiográficas particulares de cada local.

Conforme estabelecido e apresentado no item anterior, foram utilizadas metodologias diferentes em função do tipo de estrutura hidráulica. Estas metodologias têm como parte comum os estudos de análise de frequência de chuvas máximas de 1 dia, a partir do qual serão determinadas, utilizando as relações entre chuvas de diferentes durações, as tormentas de projeto para diferentes períodos de retorno que, usualmente, são denominadas de relações intensidade-duração e frequência (IDF). A metodologia específica a ser utilizada para as estruturas de drenagem e para os vertedouros e aquedutos é descrita resumidamente a seguir:

4.1 Estruturas de Drenagem

- seleção dos postos pluviométricos representativos das bacias hidrográficas delimitadas pelas estruturas hidráulicas de drenagem;
- determinação das características fisiográficas das bacias hidrográficas;
- definição da chuva de projeto, adotando uma frequência de 50 e 100 anos, uma duração igual ou superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica e uma distribuição temporal crítica;
- classificação hidrológica dos solos com base no critério do *Soil Conservation Service*;

Bacias Hidrográficas com Área de Drenagem superior a 3,5 km²

- determinação da chuva excedente através do método do *Soil Conservation Service Curve Number*
- utilização do hidrograma sintético do *Soil Conservation Service* para a transformação da chuva excedente em escoamento superficial;
- simulação do processo chuva-vazão para períodos de retorno (TR) de 50 e 100 anos, conforme o critério mencionado anteriormente;
- determinação dos hidrogramas afluentes de projeto de cada estrutura hidráulica.

Bacias Hidrográficas com Área de Drenagem inferior ou igual a 3,5 km²

- determinação dos coeficientes de escoamento das bacias hidrográficas (C), em função das características dos solos, vegetação e topografia;
- utilização do método racional para obter as vazões máximas de projeto em função da área de drenagem, do tipo de solo, da topografia, da cobertura vegetal e do tempo de concentração, para períodos de retorno (TR) de 50 e 100 anos.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

4.2 Aquedutos e Vertedouros das Barragens

- seleção dos postos pluviométricos representativos das bacias hidrográficas delimitadas pelos aquedutos e barragens;
- determinação das características fisiográficas das bacias hidrográficas;
- definição da chuva de projeto, adotando uma frequência de 500 e 1.000 anos e uma duração pouco superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica;
- classificação hidrológica dos solos com base no critério do *Soil Conservation Service*;
- determinação da chuva excedente através do método do *Soil Conservation Service Curve Number*;
- utilização do hidrograma sintético do *Soil Conservation Service* para a transformação da chuva excedente em escoamento superficial;
- simulação do processo chuva-vazão para tormentas com períodos de retorno (TR) de 1.000 anos e distribuição temporal crítica;
- determinação dos hidrogramas afluentes de projeto dos aquedutos e barragens.

5 . ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE CHUVAS MÁXIMAS

5.1 Seleção dos Postos Pluviométricos de Interesse

Os postos pluviométricos disponíveis na área estão mostrados na **Tabela 5.1** identificados pelo nome e o número da ANEEL, e o respectivo período com disponibilidade de dados diários de precipitação.

Uma vez que o objetivo do estudo é a determinação de hidrogramas nas bacias hidrográficas que interceptam o sistema de adução, utilizando períodos de retorno entre 50 e 1.000 anos, foram considerados os seguintes critérios na seleção preliminar dos postos pluviométricos:

- séries extensas de totais precipitados diários que tivessem um período de observação de, no mínimo, 25 anos;
- proximidade com o sistema de adução, permitindo reproduzir de forma mais segura o regime de chuvas intensas na bacia hidrográfica.

número de ordem	Posto Pluviométrico	Número do Posto	Período de Dados		número de anos
			Início	Fim	
1	Brejo Santo	3842906	1912	1996	85
2	Jati	3851399	1934	1996	63
3	Poço	3852033	1962	1996	35
4	Açude Quixabinha	3842859	1962	1996	35
5	Mauriti	3842844	1961	1996	36
6	Bonito de Santa Fé	3842698	1933	1991	59
7	Mararupã	3842547	1961	1996	36
8	Anauã	3842574	1962	1996	35
9	Barro	3842343	1961	1996	36
10	São José de Piranhas	3843202	1912	1991	80
11	Cuncas	3842254	1934	1996	63
12	Sítio Arapuã	3842185	1935	1991	57

Tabela 5.1 – Postos Pluviométricos de Interesse no Trecho II



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

5.2 Definição das Séries de Totais Precipitados

Os arquivos computacionais contendo as séries de totais precipitados diários fornecidas pelos Estudos de Inserção Regional foram analisados, descartando-se os anos hidrológicos com falhas. Foi desenvolvido um programa computacional em Visual Basic que permite fazer a leitura da série de totais precipitados diários de cada posto pluviométrico e determinar os totais precipitados máximos de cada ano hidrológico, definindo uma série de chuvas máximas com duração de 1 dia.

Séries de Chuvas Máximas Anuais apresenta, para cada posto pluviométrico, as séries de totais precipitados máximos de 1 dia. Para os postos pluviométricos Brejo Santo e Jati são apresentados, também, os totais precipitados máximos de 2 e 3 dias consecutivos, cujo objetivo será justificado *a posteriori*. Para cada série foram determinados os principais parâmetros estatísticos que caracterizam a distribuição de frequência dos totais precipitados máximos, incluindo o número de elementos, a média, o mínimo, o máximo, o desvio-padrão, a curtose e o coeficiente de assimetria.

As séries de totais precipitados máximos foram verificadas quanto a presença de eventos extremos ou *outliers* através do teste sugerido por Grubbs e Beck. Este teste permitiu constatar a presença de *outliers* nas série de chuvas máximas de 1 dia dos postos de Jati (3851399) e Cuncas (3842254), ocorridos em 1.984 e 1.980 que indicavam, respectivamente, totais precipitados de 168,5 e 173 mm. Desta forma, gerou-se uma nova série de chuvas máximas retirando-se estes eventos extremos. O Anexo I – Séries de Chuvas Máximas Anuais apresenta, para estes postos pluviométricos, as séries de totais precipitados máximos de 1 dia sem a presença dos *outliers*.

5.3 Ajustes das Distribuições Probabilísticas às Séries de Chuvas Máximas

A análise dos parâmetros estatísticos das séries de chuvas máximas permitiu antever que as distribuições probabilísticas Gama, Log-Pearson Tipo III e Gama Generalizada seriam as que melhor se ajustariam aos dados. Isto se deve, principalmente, à grande flexibilidade destas distribuições que permite bons ajustes às séries de chuvas máximas dentro de uma faixa ampla de valores de curtose e assimetria.

Para algumas séries de precipitações máximas anuais foram ajustadas outras distribuições probabilísticas, como a distribuição Normal para as séries de chuvas máximas de 1 dia dos postos Bonito de Santa Fé e Sítio Arapuã. No entanto, optou-se por limitar as distribuições probabilísticas a serem ajustadas para as diferentes séries, com o objetivo de manter a uniformidade metodológica. Ressalta-se, no entanto, que a distribuição Normal é um caso particular da distribuição probabilística Gama Generalizada.

As distribuições probabilísticas Gama, Pearson Tipo III, Log-Pearson Tipo III e Gama Generalizada foram ajustadas às séries de chuvas máximas anuais, utilizando-se o método da máxima verossimilhança (*maximum likelihood*).

As probabilidades associadas a cada elemento das séries de precipitações máximas, usualmente denominadas de posições de plotagem, foram definidas conforme recomendado por Cunnane.

A **Figura 5.1** apresenta, graficamente, os totais precipitados máximos anuais de 1 dia, plotados segundo Cunnane, e as distribuições probabilísticas ajustadas. A **Figura 5.2** apresenta o total precipitado máximo anual de 2 e 3 dias consecutivos do posto Brejo Santo (3842906) e as distribuições probabilísticas ajustadas, utilizando os mesmos critérios e metodologias. Verifica-se que, de maneira geral, as distribuições probabilísticas apresentaram um bom ajuste às séries de totais precipitados máximos anuais.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

5.4 Precipitações Máximas para os Postos Pluviométricos Representativos

Para cada posto pluviométrico verificou-se a distribuição probabilística que resultasse em uma melhor aderência às séries de totais precipitados máximos anuais. Esta verificação foi feita utilizando os critérios estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Chi-Quadrado. No caso das distribuições probabilísticas propiciarem ajustes às séries de totais precipitados máximos anuais semelhantes, optou-se pela distribuição que resultasse em maiores chuvas de projeto.

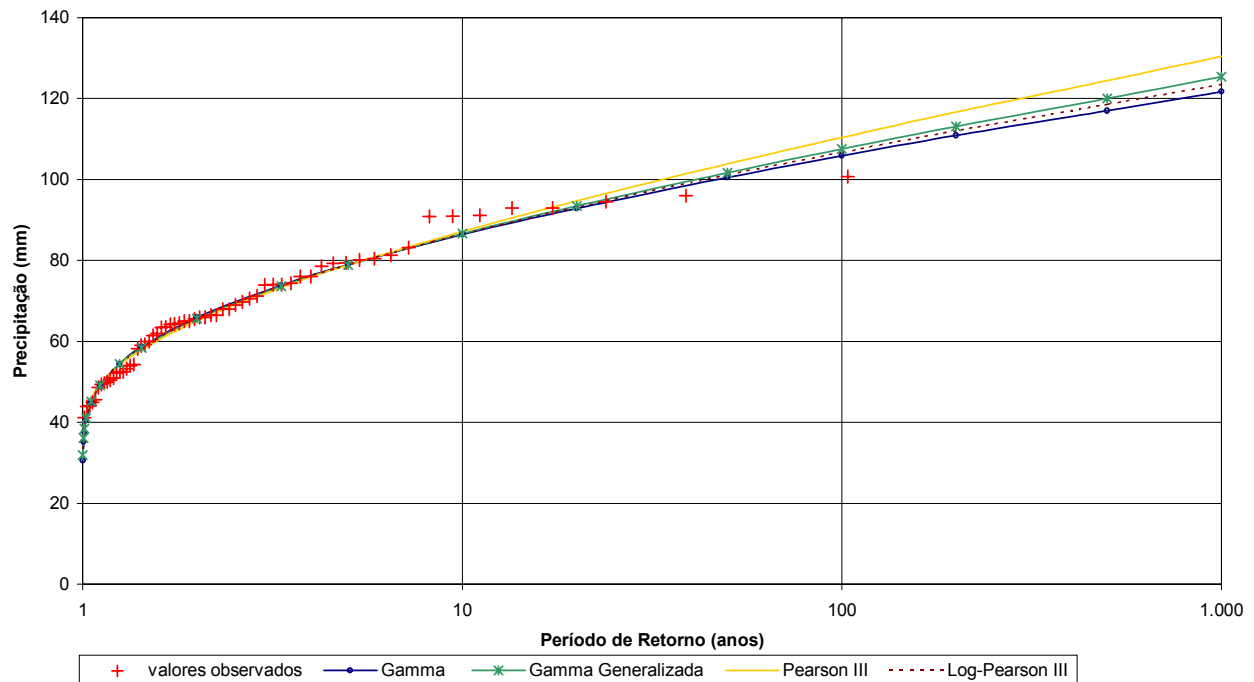


Figura 5.1 – Ajuste das Distribuições de Frequência às precipitações Máximas de 1 dia Posto Cuncas - 3842254

Para quase todos os casos houveram distribuições probabilísticas e métodos de ajuste equivalentes em termos de aderência. Assim, escolheu-se a distribuição que resultasse nos maiores valores de precipitações máximas, desde que factíveis e coerentes com o fenômeno físico.

Verifica-se nas **Figuras 5.1 e 5.2** que as distribuições probabilísticas Gama Generalizada e Log-Pearson Tipo III ajustam-se de forma muito semelhante às séries de totais precipitados máximos anuais. Da mesma forma, estas distribuições resultam nos maiores valores de precipitações máximas.

Optou-se pela distribuição Gama Generalizada uma vez que resulta, para a maioria dos postos pluviométricos, em valores de precipitações máximas ligeiramente superiores aos obtidos pela distribuição Log-Pearson III.

A **Figura 5.3** apresenta a distribuição Gama Generalizada ajustada às séries de precipitações diárias máximas anuais do posto pluviométrico selecionado.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

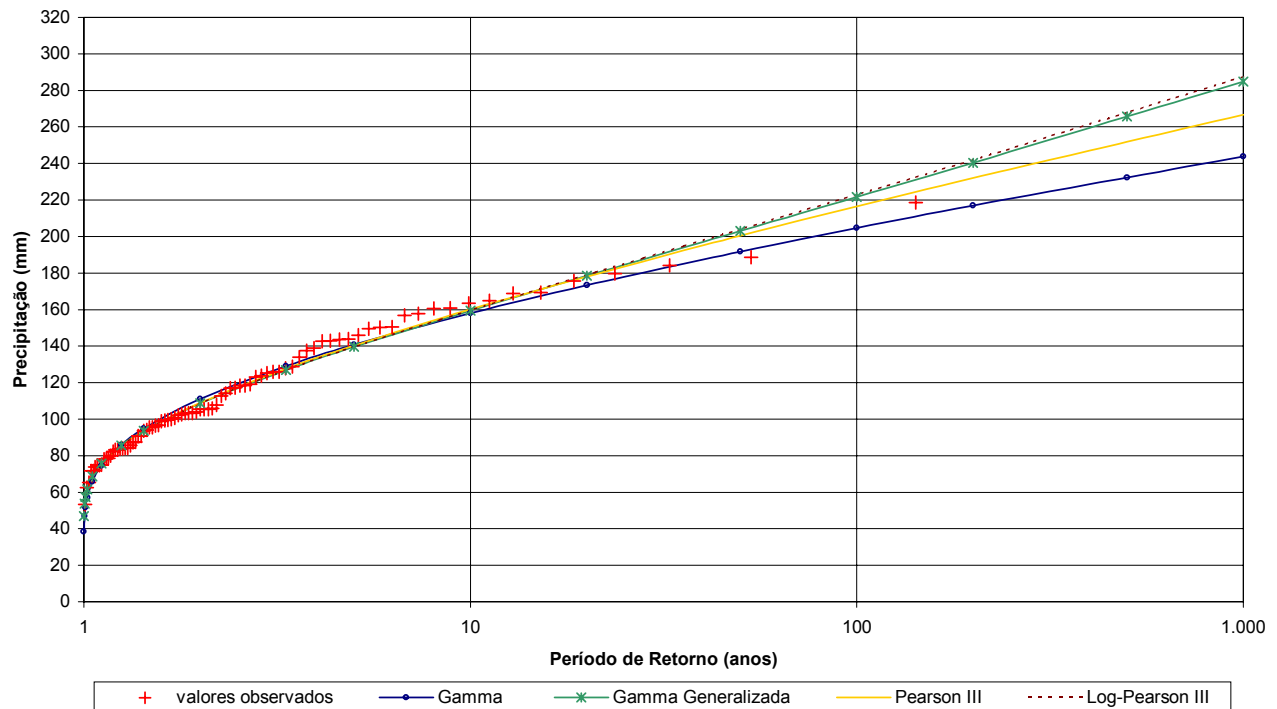


Figura 5.2 – Ajuste das Distribuições de Frequência às Precipitações Máximas de 3 dias Posto Brejo Santo - 3842906

Observa-se também na **Figura 5.3**, que a distribuição probabilística Gama Generalizada quando ajustada às séries de totais precipitados máximos anuais de maior extensão na área do projeto, correspondentes aos postos de Brejo Santo (3842906) e São José de Piranhas (3843202), resultam em curvas muito semelhantes.

Desta forma, conclui-se que a região de projeto do Trecho III é relativamente uniforme quanto às precipitações máximas. Assim, a distribuição probabilística Gama Generalizada foi ajustada às séries de totais precipitados máximos anuais do posto de Brejo Santo para representar as precipitações máximas na região do projeto.

A **Tabela 5.2** apresenta as precipitações máximas no posto pluviométrico Brejo Santo, representativo da área de projeto do Trecho III, para durações de 1, 2 e 3 dias e diferentes períodos de retorno.

Para obter-se as precipitações máximas para durações inferiores a 1 dia, foi utilizado o trabalho desenvolvido pelo engenheiro Taborga em 1.974 que, com base nas análises da publicação de Pfafstette determinou diversas relações como:

- de 1,095 entre as precipitações intensas de 24 horas e 1 dia;
- de $0,45 \cdot TR^{-0,014}$ entre as precipitações intensas de 1 hora e 24 horas.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Probabilidade de Excedência	Período de Retorno (anos)	Totais Precipitados Máximos Anuais (mm)		
		Brejo Santo 3842906 - 1 dia	Brejo Santo 3842906 - 2 dias	Brejo Santo 3842906 - 3 dias
0,001	1.000	201,2	229,8	284,9
0,002	500	187,3	215,5	265,7
0,005	200	168,9	196,8	240,3
0,01	100	155,4	182,7	221,6
0,02	50	142,0	168,5	203,1
0,05	20	124,4	149,5	178,5
0,1	10	110,8	134,5	159,5
0,2	5	96,5	118,4	139,5
0,3	3,33	87,5	108,2	126,9
0,5	2,00	74,6	93,2	108,8
0,7	1,43	63,9	80,5	93,6
0,8	1,25	58,3	73,7	85,6
0,9	1,11	51,4	65,3	75,8
0,95	1,05	46,4	59,2	68,6
0,98	1,02	41,4	53,0	61,5
0,99	1,01	38,4	49,3	57,3
0,995	1,01	35,9	46,1	53,7
0,999	1,00	31,3	40,2	47,0

Tabela 5.2 – Precipitações Máximas no Posto Pluviométrico Brejo Santo, Representativo da Área de Projeto

Além destas relações, alguns estudos desenvolvidos para diferentes regiões do Brasil sugerem que para tormentas de uma probabilidade de ocorrência qualquer, a média aritmética das chuvas de 2 e de 3 dias pode ser considerada uma boa estimativa da chuva de 48 horas.

Estas relações foram aplicadas para as precipitações diárias máximas com período de retorno de 50, 100, 500 e 1.000 anos, resultando nas precipitações máximas entre 6 min e 48 horas apresentadas na **Tabela 5.3** para o posto pluviométrico Brejo Santo, representativo da área de projeto do Trecho III.

5.5 Relação Intensidade-Duração e Freqüência (IDF) para os Postos Representativos

As precipitações máximas apresentadas na **Tabela 5.3** para períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1.000 anos e durações entre 1 e 48 horas permitiram definir as relações intensidade-duração-freqüência (IDF) do posto pluviométrico Brejo Santo, representativo da área de drenagem das bacias hidrográficas de interesse.

A **Figura 5.4** apresenta a relação I-D-F do posto pluviométrico Brejo Santo, que permite obter as precipitações máximas para diferentes durações e períodos de retorno.

Período de Retorno (anos)	Precipitações Máximas (mm)												
	Duração da Tormenta (horas)												
	6 minutos	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	9,0	12,0	24,0	48,0	1 dia	2 dias	3 dias
50	19,3	66,3	75,7	85,2	94,7	113,6	132,9	142,0	155,5	185,8	142,0	168,5	203,1
100	21,1	71,8	82,3	92,8	103,3	124,3	145,4	155,4	170,1	202,1	155,4	182,7	221,6
500	25,4	84,6	97,6	110,7	123,7	149,8	175,3	187,3	205,0	240,6	187,3	215,5	265,7
1.000	27,3	90,0	104,2	118,4	132,6	160,9	188,3	201,2	220,3	257,3	201,2	229,8	284,9

Tabela 5.3 – Relação de Precipitação Máxima – Duração e Freqüência no posto de Brejo Santo, Representativo da Área de Projeto do Trecho III - Posto Pluviométrico Brejo Santo - 3842906



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

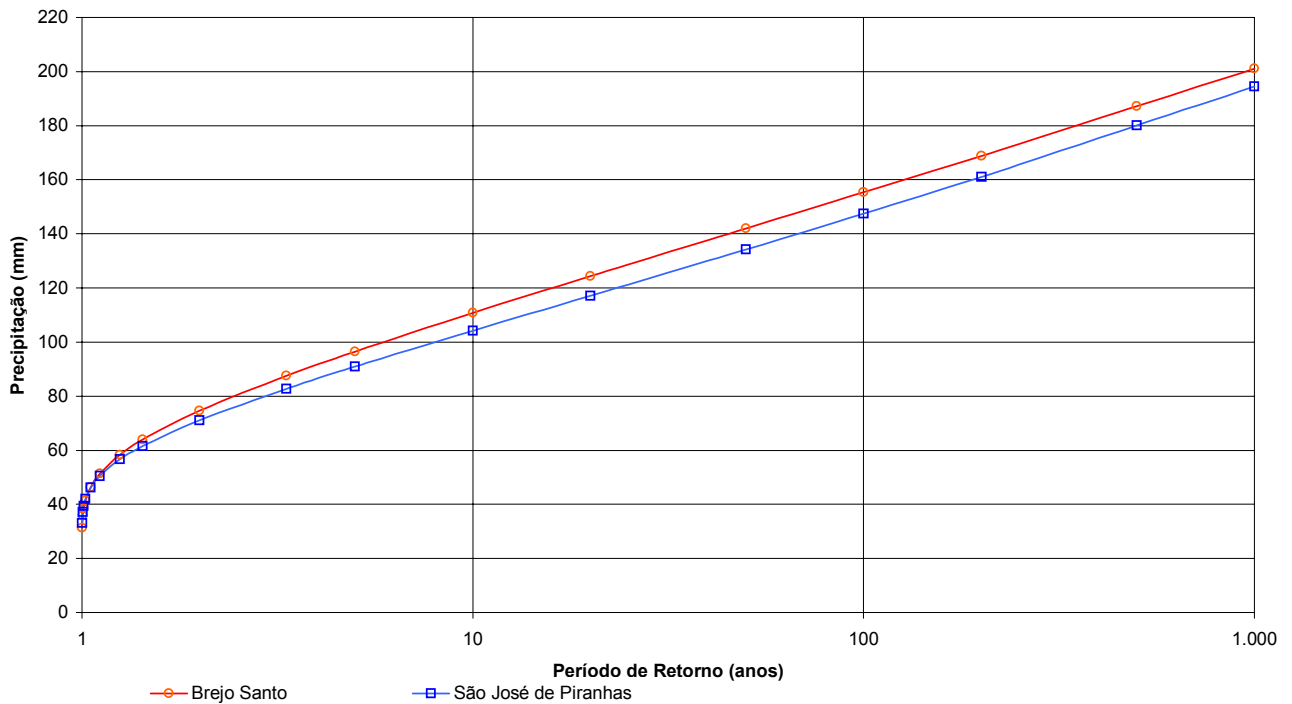


Figura 5.3 – Distribuições de Frequência ajustada às Séries de Precipitações Máximas de 1 dia dos Postos Selecionados para o Trecho III

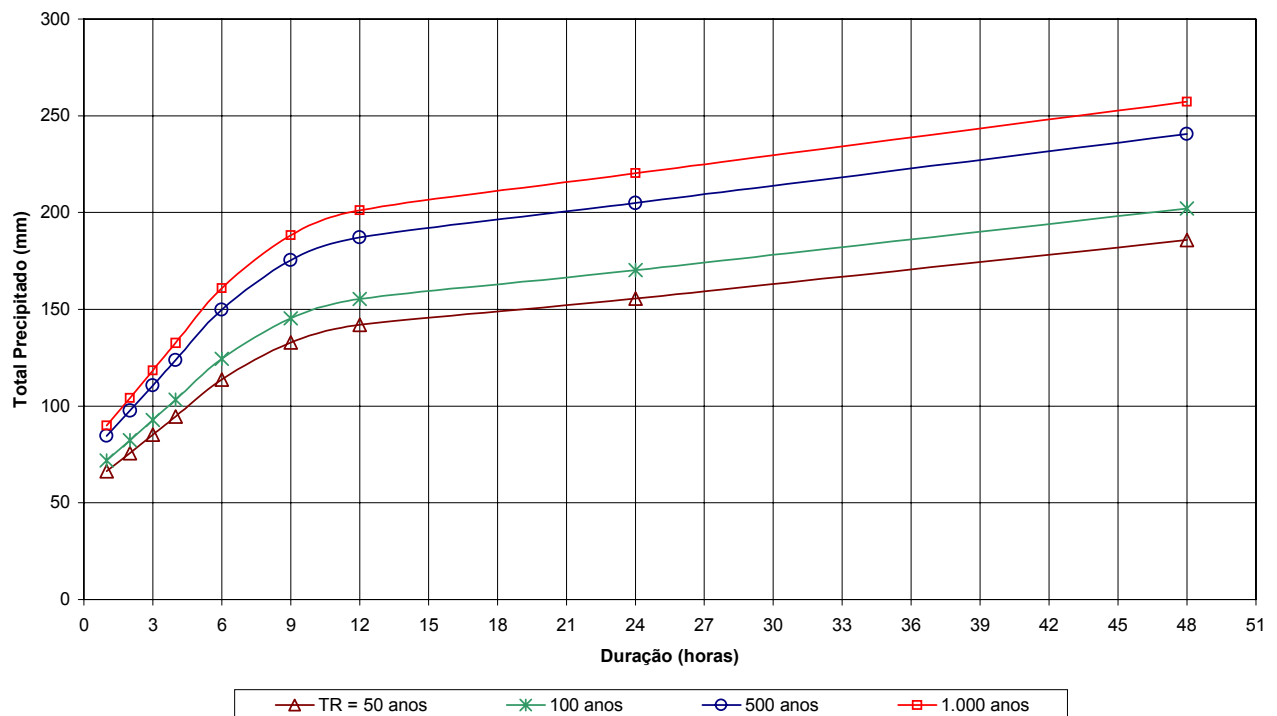


Figura 5.4 – Relação Totais Precipitados – Duração e Frequência para o Posto Pluviométrico Brejo Santo – 3842906



6 . DEFINIÇÃO DAS CHUVAS DE PROJETO

6.1 Duração das Chuvas de Projeto

De acordo com os critérios estabelecidos, as chuvas de projeto para a determinação das vazões e hidrogramas de projeto das estruturas de drenagem têm períodos de retorno de 50 e 100 anos, enquanto para os aquedutos e vertedouros das barragens as frequências são de 500 e 1.000 anos. A duração da chuva foi escolhida de forma a garantir que toda a bacia hidrográfica estivesse contribuindo para a formação do hidrograma, resultando em volumes críticos. Assim, para a duração da chuva de projeto foi adotado um valor superior ao tempo de concentração da bacia.

6.2 Fator de Redução de Área

O fator de redução de área, que permite avaliar a chuva média na sub-bacia em relação à chuva no posto, foi obtido com base na área de drenagem da bacia hidrográfica e na duração da chuva. Destaca-se que para as chuvas de 1 e 6 horas foram utilizados os resultados de estudos desenvolvidos para regiões semi-áridas, que indicam valores significativamente inferiores aos usualmente utilizados, obtidos para climas úmido ou sub-úmidos. Para chuvas entre 1 e 6 horas, foram feitas interpolações utilizando-se escala *bi-log*. Os fatores de redução de área ficaram entre 0,72 e 1.

6.3 Distribuição Temporal das Chuvas de Projeto

Outro aspecto fundamental na definição dos hidrogramas de projeto é a distribuição temporal das chuvas, ou seja, o hietograma das chuvas de projeto. O hietograma da chuva afeta significativamente a forma e a vazão de pico do hidrograma resultante. Assim, esta escolha deve ser feita com base na análise dos dados referentes às distribuições temporais das chuvas na área ou adotando-se distribuições que caracterizam uma situação crítica de projeto. Uma vez que não há postos pluviográficos na área, foram utilizadas as distribuições temporais sugeridas por Huff. As duas distribuições temporais de chuvas que são normalmente investigadas são as tormentas de primeiro e segundo quartis. A distribuição do primeiro quartil apresenta a chuva concentrada nos primeiros minutos da tormenta.

Seguindo-se as recomendações usuais de projeto, utilizou-se a distribuição temporal do primeiro quartil, com probabilidade de ocorrência de 50 %. A **Figura 6.1** apresenta esta distribuição temporal, com o tempo em percentual da duração e a precipitação em percentual do total precipitado.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

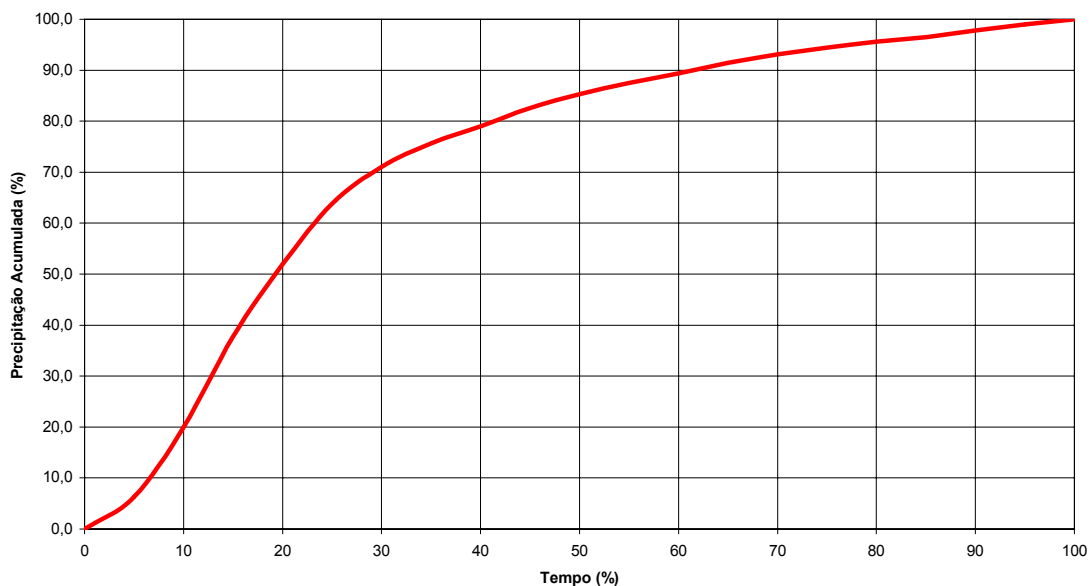


Figura 6.1 – Distribuição Temporal das Chuvas de Projeto Chuva de 1. Quartil com 505 de Probabilidade

7 . MODELAGEM DO PROCESSO CHUVA-VAZÃO

7.1 Método do Hidrograma Unitário

Para as bacias hidrográficas dos aquedutos e barragens estudadas na fase anterior do projeto básico, o processo de transformação da chuva em escoamento superficial foi feito através do modelo computacional HEC-1, utilizando o hidrograma unitário sintético sugerido pelo SCS. A precipitação excedente foi calculada através do método do número da curva do SCS, utilizando valores de CN para condições antecedentes intermediárias entre os tipos II-III.

8 . SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O hidrograma da bacia de Cuncas para um período de retorno de 1.000 anos foi obtido através dos dados do posto Brejo Santo – 3842906, utilizando o método do “Soil Conservation Service (SCS)”, com os seguintes dados:

- Área da bacia hidrográfica:.....A = 96,9 km²
- Velocidade de escoamento: 0,7 m/s
- Comprimento do talvegue:..... 11,4 km
- Tempo de concentração: 4,36 horas
- Número da curva de solo:..... CN = 70
- Vazão máxima = 414 m³/s

Utilizando-se o mesmo método do SCS e mesmo dados de entrada porém com um modelo computacional HSCS.BAS, gerou-se novamente o hidrograma de Cuncas, obtendo-se pico e forma semelhante, (**Gráfico 8.1**).

Uma vez calibrado para Cuncas, gerou-se com os mesmos dados de chuva, velocidade de escoamento e número de curva de solo, os hidrogramas das bacias da nova fase deste projeto, Caiçara e Várzea Grande.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

O hidrograma da bacia de Caiçara para um período de retorno de 1.000 anos foi obtido através dos dados de chuva do posto Brejo Santo – 3842906, utilizando o Método de “Soil Conservation Service (SCS)”, com os seguintes dados:

- Área da bacia hidrográfica: $A = 11,7 \text{ km}^2$;
- Velocidade de escoamento: $V = 0,7 \text{ m/s}$;
- Comprimento do talvegue: $L = 5,5 \text{ km}$;
- Tempo de concentração: $t_c = 2,18 \text{ horas}$;
- Número da curva: $CN = 70$.
- Vazão máxima $= 70 \text{ m}^2/\text{s}$

O hidrograma da bacia de Várzea Grande para um período de retorno de 1.000 anos foi obtido através dos dados do posto Brejo Santo – 3842906, com o modelo computacional HSCS>BAS e os respectivos dados:

- Área da bacia hidrográfica: $A = 3,6 \text{ km}^2$
- Velocidade de escoamento: $0,7 \text{ m/s}$
- Comprimento do talvegue: $2,5 \text{ km}$
- Tempo de concentração: 1 hora
- Número da curva de solo: $CN = 70$
- Vazão máxima: $27,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Os **Gráficos 8.1, 8.2 e 8.3**, correspondem aos hidrogramas de projeto dos extravasores das Barragens de Cuncas, Caiçara e Várzea Grande para o período de ocorrência de 1.000 anos.

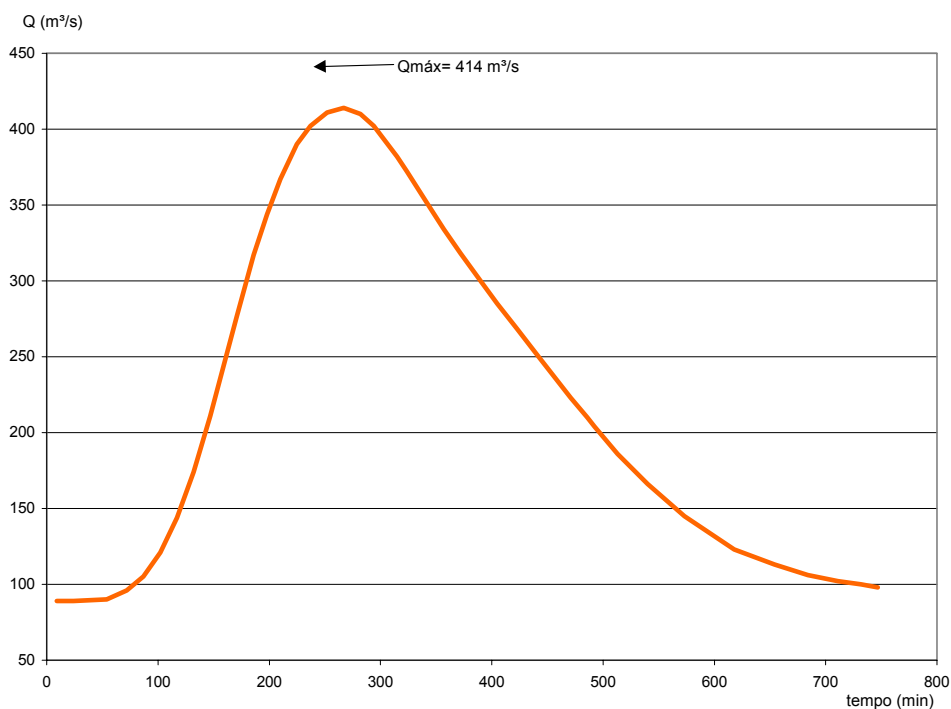


Gráfico 8.1 – Hidrograma da Bacia Hidrográfica de Cuncas para mil anos de recorrência



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

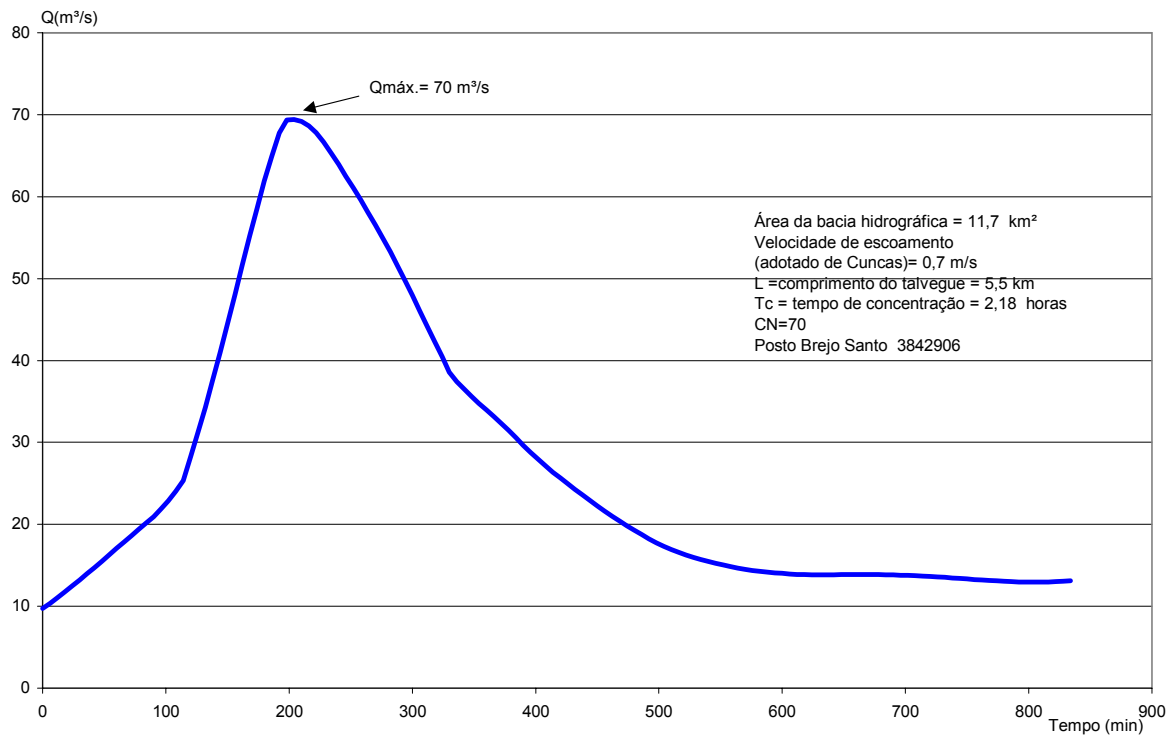


Gráfico 8.2 – Hidrograma afluente ao reservatório Caiçara para enchente de TR = mil anos

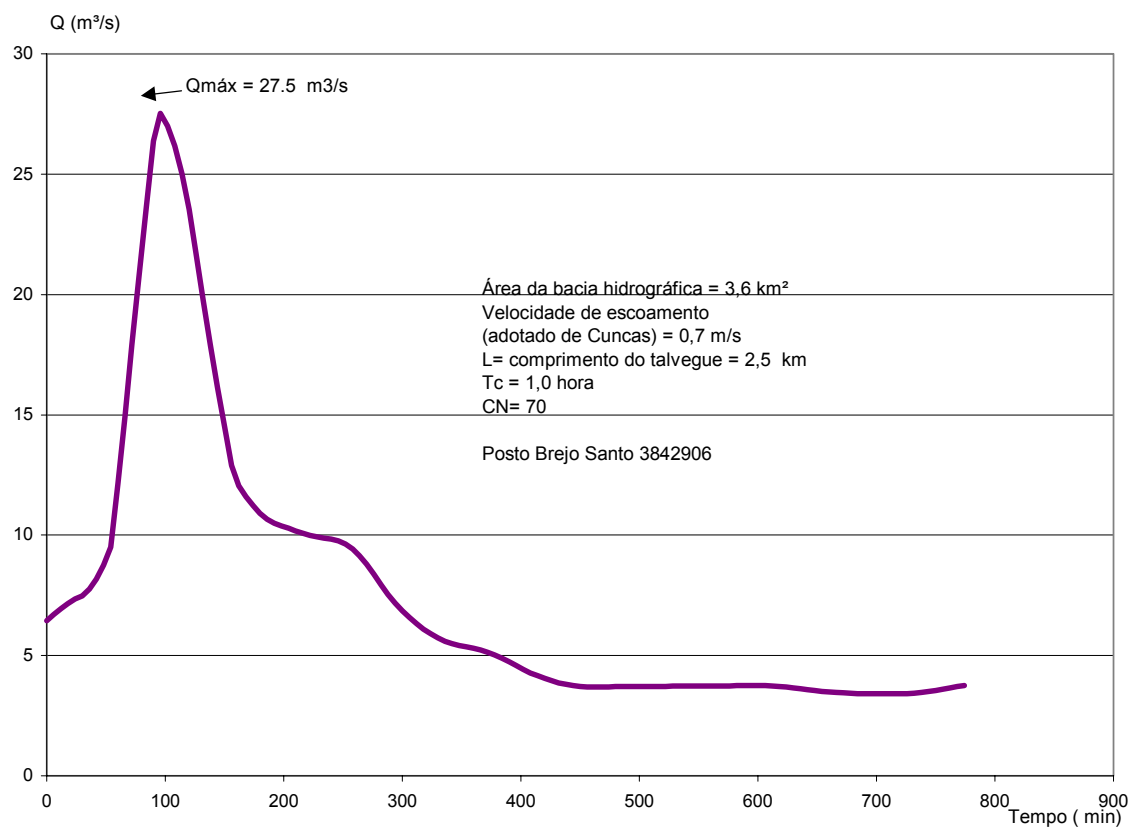


Gráfico 8.3 – Hidrograma afluente ao reservatório Várzea Grande para enchente de TR = mil anos



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

9 . ESTUDOS ENERGÉTICOS

Os conceitos básicos que orientaram estes estudos foram:

- O sistema de geração e transmissão será do tipo isolado, pois toda energia das usinas será utilizada exclusivamente para o acionamento das bombas do Trecho I. Como consequência, o acionamento das usinas se dará somente nos períodos de bombeamento, demandando regras operacionais bastante peculiares;
- Outro conceito desenvolvido neste estudo foi o da modulação da potência de cada turbina, isto é, a determinação de vazões diferentes para cada turbina de uma mesma usina, de forma a permitir a operação de geração com vazões baixas, da ordem de 2 m³/s até o máximo previsto para cada trecho, garantindo a flexibilidade operacional;
- Adaptação da forma operacional para atender as demandas procurando-se maximizar as potências instaladas.

9.1 Diretrizes do Estudo

Os estudos foram desenvolvidos de acordo com as seguintes diretrizes:

- As demandas para os cenários denominados atual, 2.010 e 2.025 e a capacidade hidráulica de cada trecho correspondem àquelas apresentadas no relatório “Reavaliação da Capacidade Requerida e da Operação do Sistema de Transposição das Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional”, de Fevereiro de 2.001;
- As novas usinas hidrelétricas a serem consideradas, além de Jati e Atalho, já contempladas nos estudos de viabilidade são as seguintes: Ávidos I, Ávidos II, São Gonçalo, Salgado I e Salgado II;
- Os rendimentos utilizados na definição das máquinas das usinas hidrelétricas foram 97 % para o gerador e de 92 % para a turbina;
- As perdas de carga consideradas para os circuitos de adução e geração foram de 3 % da queda bruta;
- A potência instalada dos aproveitamentos e a respectiva modulação foram definidas de forma a maximizar a geração hidrelétrica, e por isso dimensionada por critérios estritamente hidráulico-operacionais.

9.2 Metodologia

A **Figura 9.1** apresenta a síntese da metodologia utilizada para a determinação da potência instalada dos aproveitamentos e as respectivas modulações.

Inicialmente foi desenvolvida a modelagem do sistema para os cenários de demandas denominados atual, 2.010 e 2.025, com a nova concepção de arranjo do sistema. Da mesma forma, foram desenvolvidas e implementadas as modelagens matemáticas e computacionais das usinas hidrelétricas.

Procedeu-se, então, às simulações do sistema para os cenários atual, 2.010 e 2.025, sem considerar quaisquer limitações de potência instalada nos aproveitamentos. Estas simulações permitiram obter as vazões aduzidas a cada trecho do sistema, bem como as vazões afluentes às usinas hidrelétricas. Além disso, as simulações forneceram a energia gerada de cada usina hidrelétrica que compõe o sistema, em cada cenário, cujo valor médio é considerado como o potencial de produção energética.

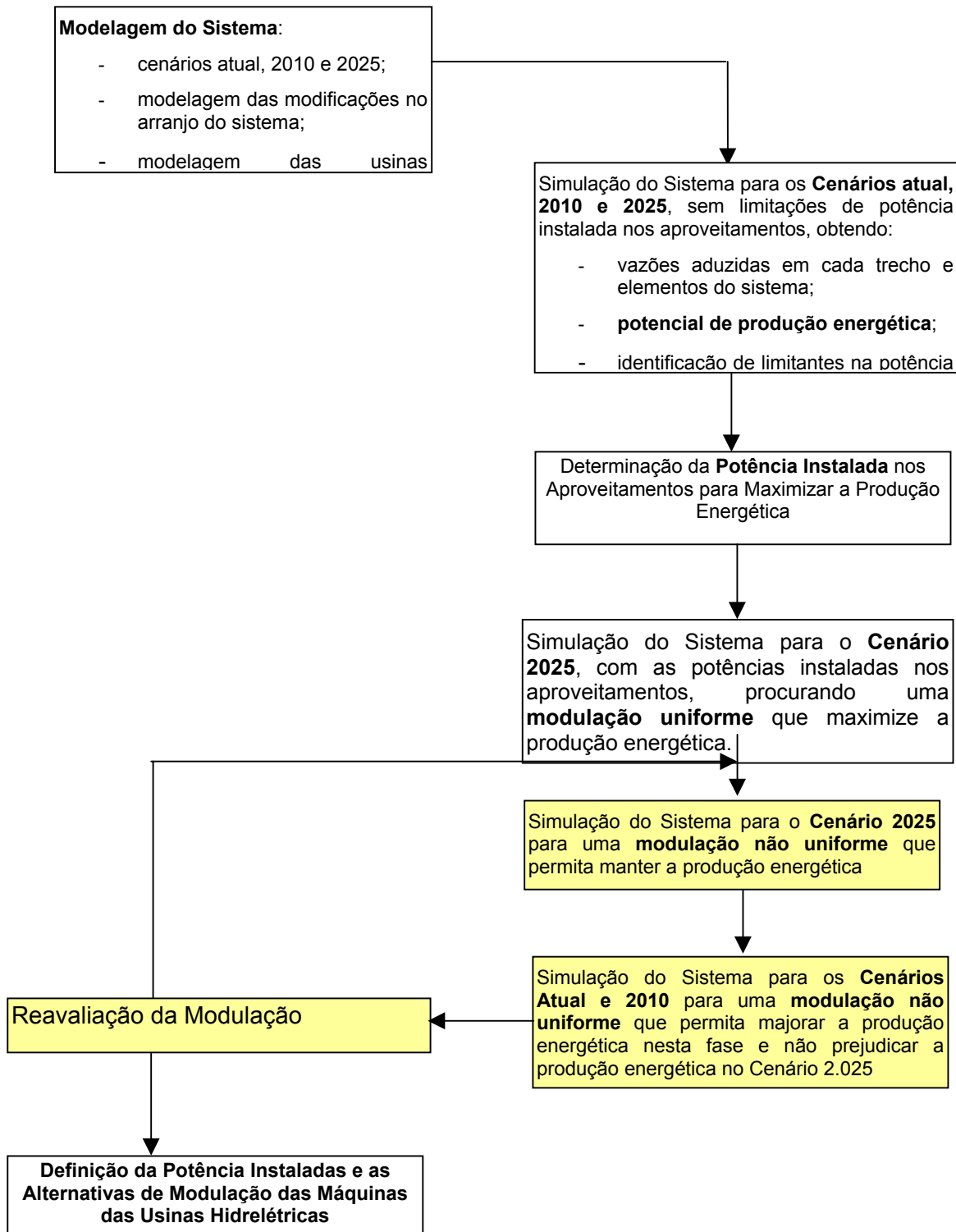
Os resultados de geração energética em cada usina foram analisados utilizando as curvas de permanência, permitindo identificar incrementos desnecessários de potência instalada, ou seja, aumentos expressivos da motorização da usina hidrelétrica com ganhos energéticos



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

insignificantes. Esta análise permitiu determinar a potência instalada de cada usina hidrelétrica, a menos de pequenos ajustes oriundos da modulação ideal do aproveitamento.

Figura 9.1 – Metodologia dos Estudos Energéticos





Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

A partir da potência instalada foram refeitas as simulações do sistema para o Cenário 2.025, considerando uma modulação uniforme e as faixas de limitação de geração de cada máquina. As simulações do sistema foram feitas até obter as modulações uniformes que resultassem na máxima produção energética de cada usina hidrelétrica.

A fase seguinte, destacada em amarelo na **Figura 9.1**, permitiu determinar a modulação ideal para cada usina hidrelétrica. Para isso, adotou-se modulações não uniformes e foram feitas simulações para os Cenários 2.025 e para os Cenários Atual e 2.010. As simulações para o Cenário 2.025 tiveram o objetivo de verificar se a modulação adotada prejudicava a produção energética. Por sua vez, as simulações para os Cenários Atual e 2.010 procuraram identificar a modulação que permitiu maximizar a geração de energia nestas fases.

Este processo iterativo resultou na definição da potência instalada de cada usina hidrelétrica e as alternativas de modulação das máquinas.

9.3 Determinação da Potência Instalada

9.3.1 Modelagem do Sistema e das Usinas Hidrelétricas

Foram introduzidas as modificações no arranjo do sistema, considerando as alterações nos Trechos II e III. Da mesma forma, foram desenvolvidas e implementadas as modelagens matemáticas e computacionais das usinas hidrelétricas.

As usinas hidrelétricas consideradas foram: Jati, Atalho, Ávidos I, Ávidos II, São Gonçalo, Salgado I e Salgado II. As usinas hidrelétricas Ávidos II e São Gonçalo estão previstas para serem implantadas nos açudes em operação Eng. Ávidos e São Gonçalo (**Figura 9.2**).

Nota-se que a vazão afluyente a partir da estação de bombeamento EBI-3, como estabelecido nos estudos de viabilidade era $89 \text{ m}^3/\text{s}$, entretanto, visando maximizar a geração elétrica, procurou-se modificar igualmente a operação do sistema, de forma a aproveitar também o excedente das cheias dos reservatórios intermediários (Negreiros, Milagres e Jati), agregando vazões com baixa permanência, aumentando, conseqüentemente, a potência instalada nas usinas hidrelétricas de Jati e Atalho. O mesmo critério foi adotado para os trechos seguintes.

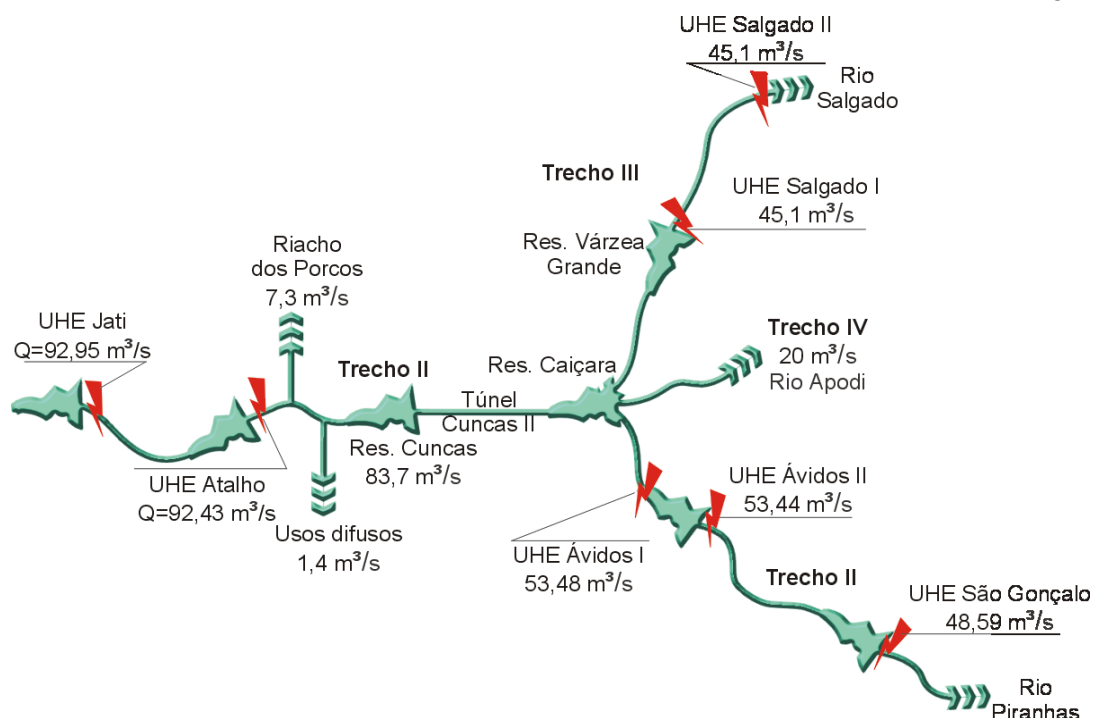


Figura 9.2 – Esquema das vazões e posição das usinas hidrelétricas



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

9.3.2 Simulações do Sistema sem Limitações de Potência Instalada

As simulações iniciais para os cenários atual, 2.010 e 2.025 foram desenvolvidas sem limitações de potência instalada. Em outras palavras, as vazões afluentes às usinas hidrelétricas são integralmente transformadas em vazões turbinadas.

As **Figuras 9.3 a 9.9** apresentam as curvas de permanência das vazões afluentes médias mensais das usinas hidrelétricas em estudo, para os cenários atual, 2.010 e 2.025. Neste caso particular as vazões afluentes devem ser entendidas como vazões que podem ser utilizadas para geração hidrelétrica (“turbináveis”), ou seja, já descontadas perdas por evaporação e retiradas a montante ou mesmo no reservatório. Ressalta-se que os aproveitamentos de Atalho, Ávidos I, Ávidos II e São Gonçalo recebem contribuições naturais do curso d’água onde estão previstos ou implantados, além dos aportes provenientes da transposição. Devido à proximidade das usinas Ávidos I e II, foram utilizadas para estes aproveitamentos as mesmas séries de vazões naturais médias mensais e de aflúncias. Foi estabelecido também, que as captações para o suprimento do projeto de irrigação das várzeas de Souza no cenário 2.9025 passariam a ser feitas diretamente do rio Piranhas, a jusante do aproveitamento.

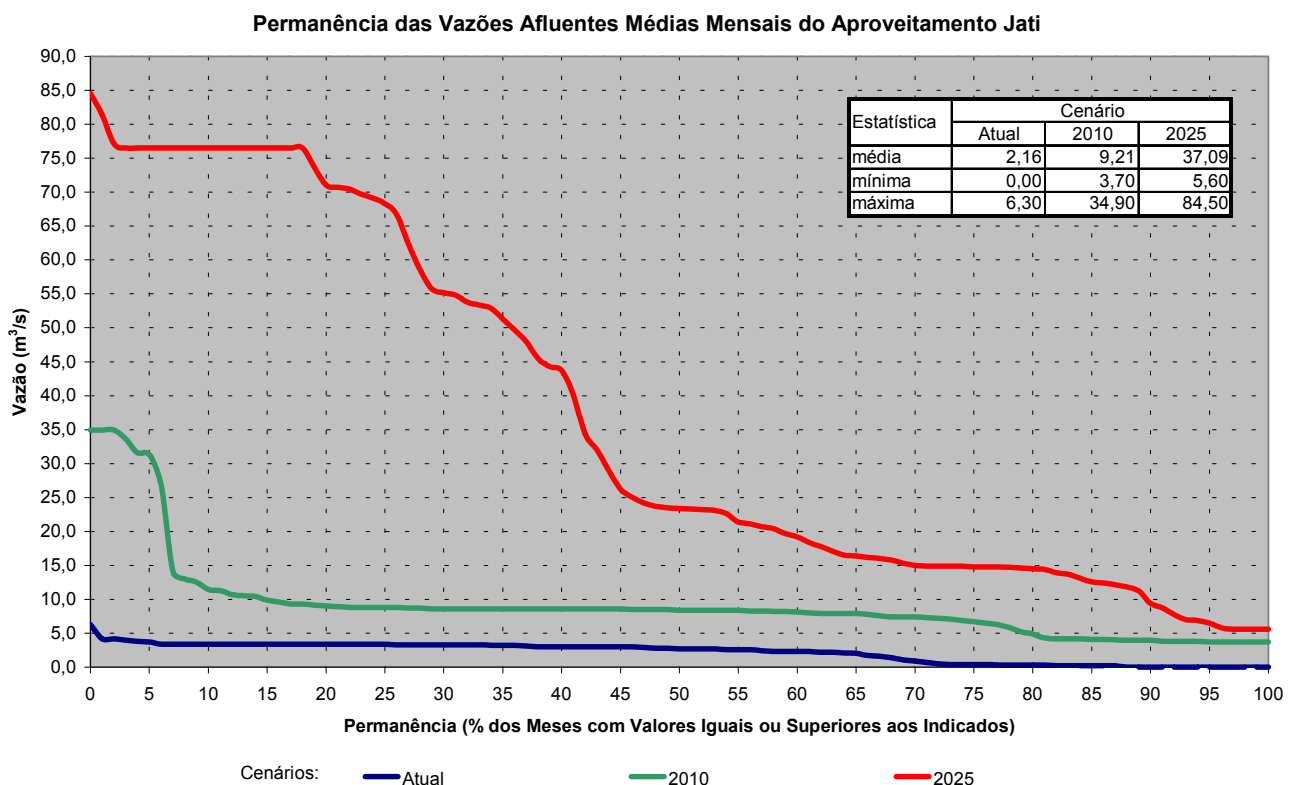


Figura 9.3



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

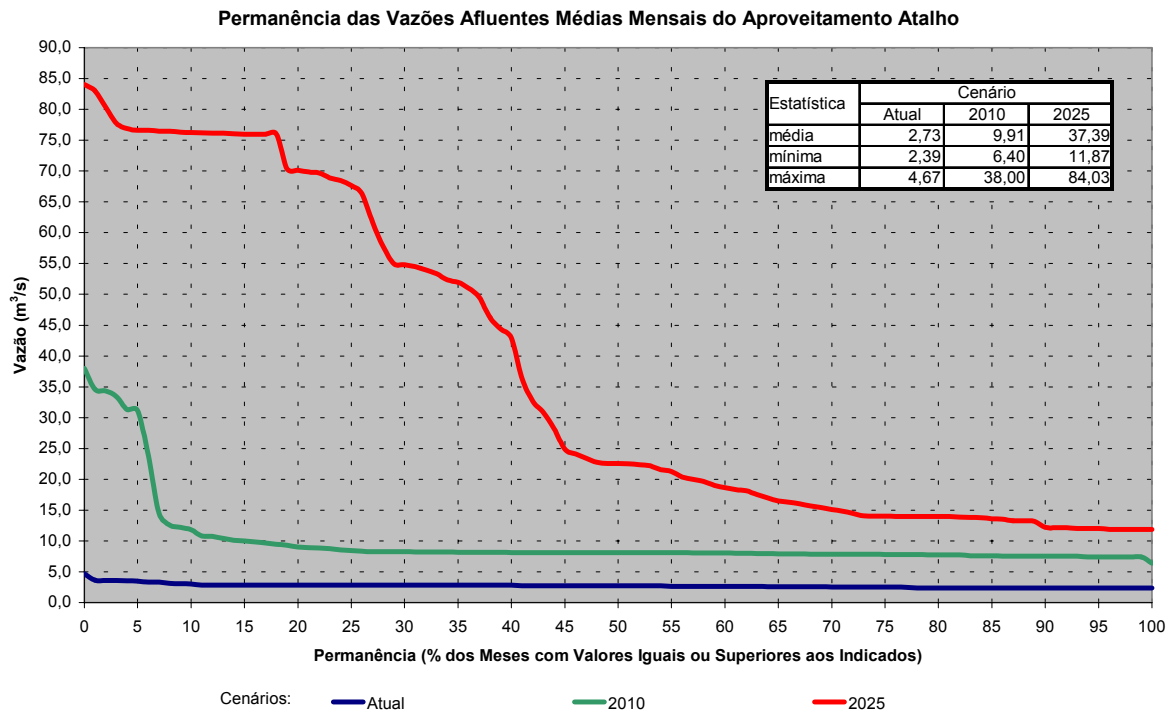


Figura 9.4

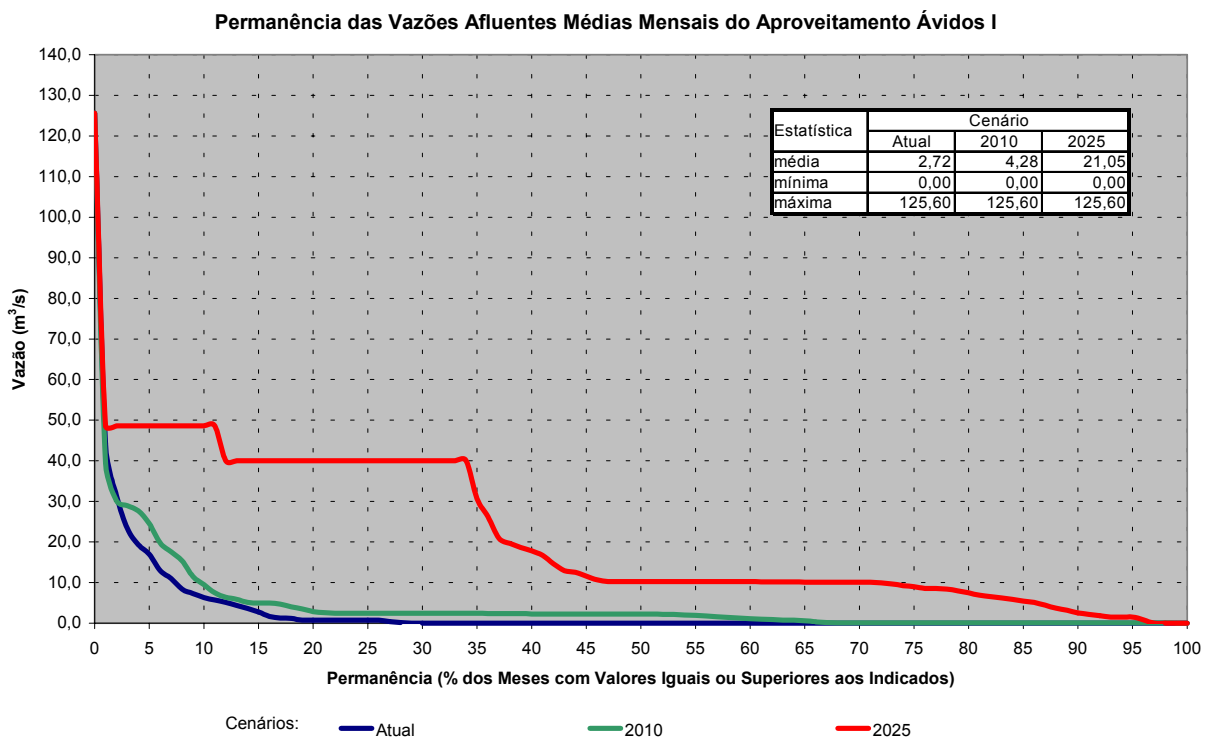


Figura 9.5



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

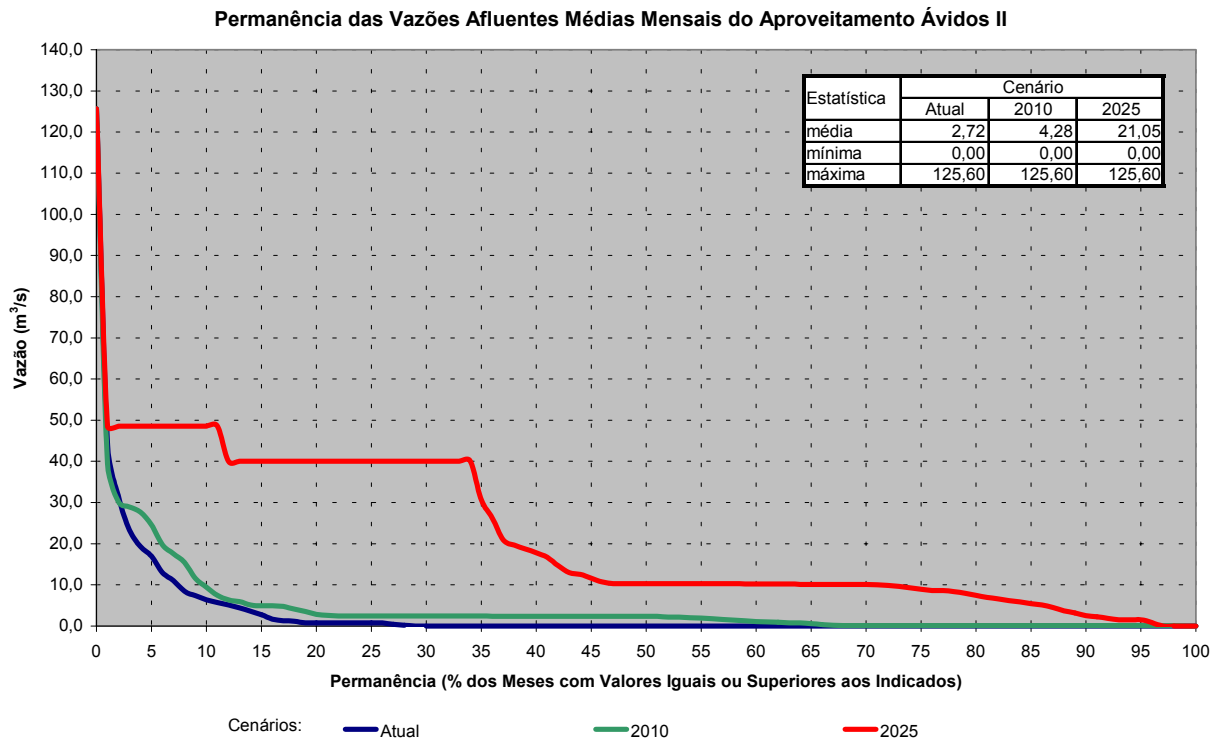


Figura 9.6

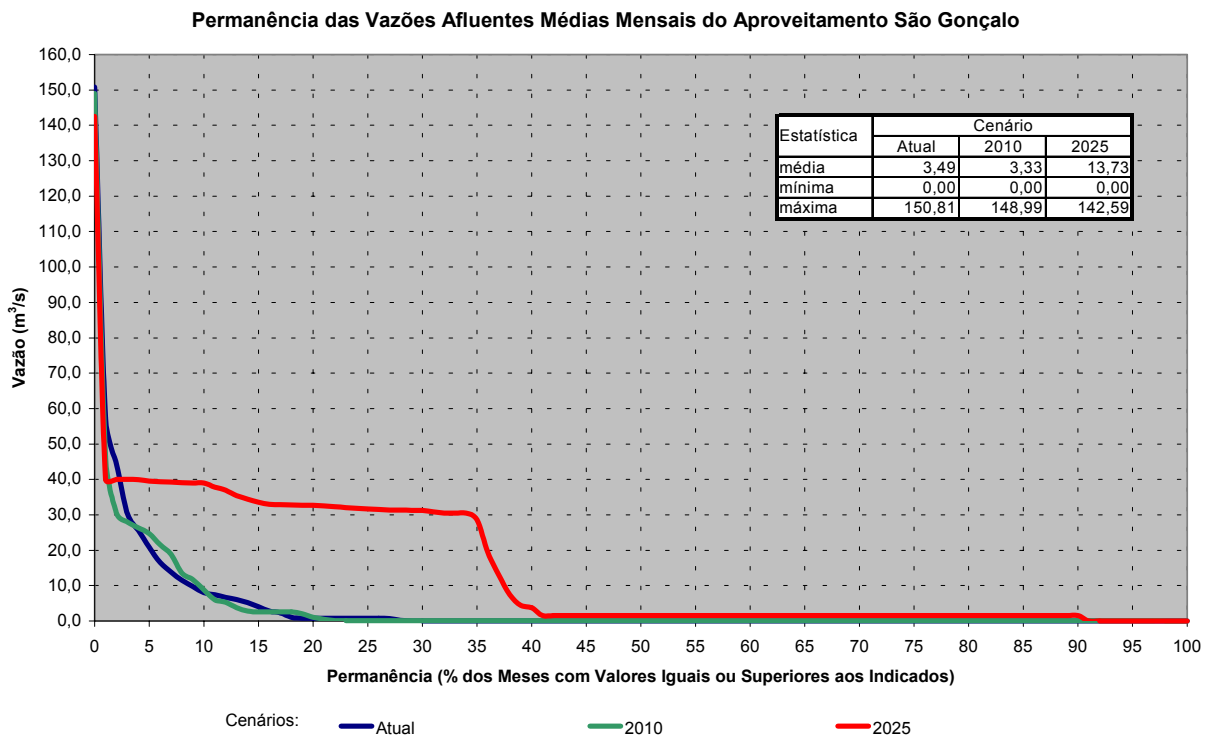


Figura 9.7



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

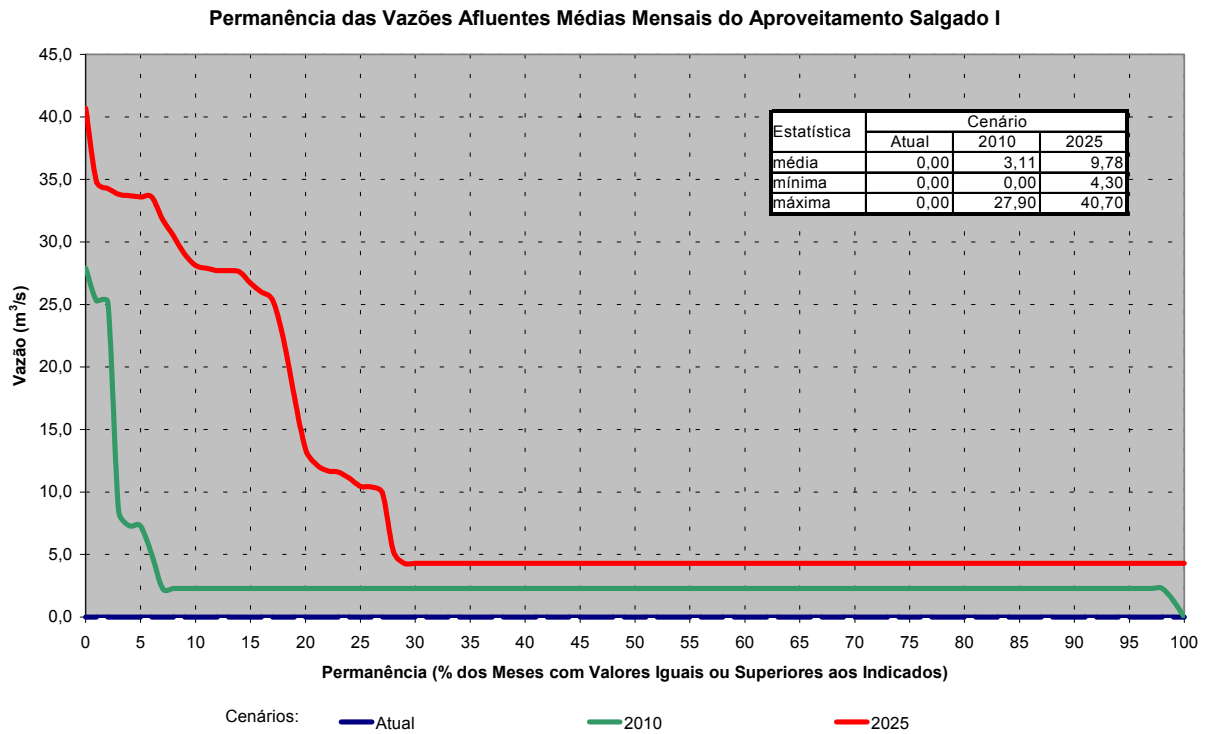


Figura 9.8

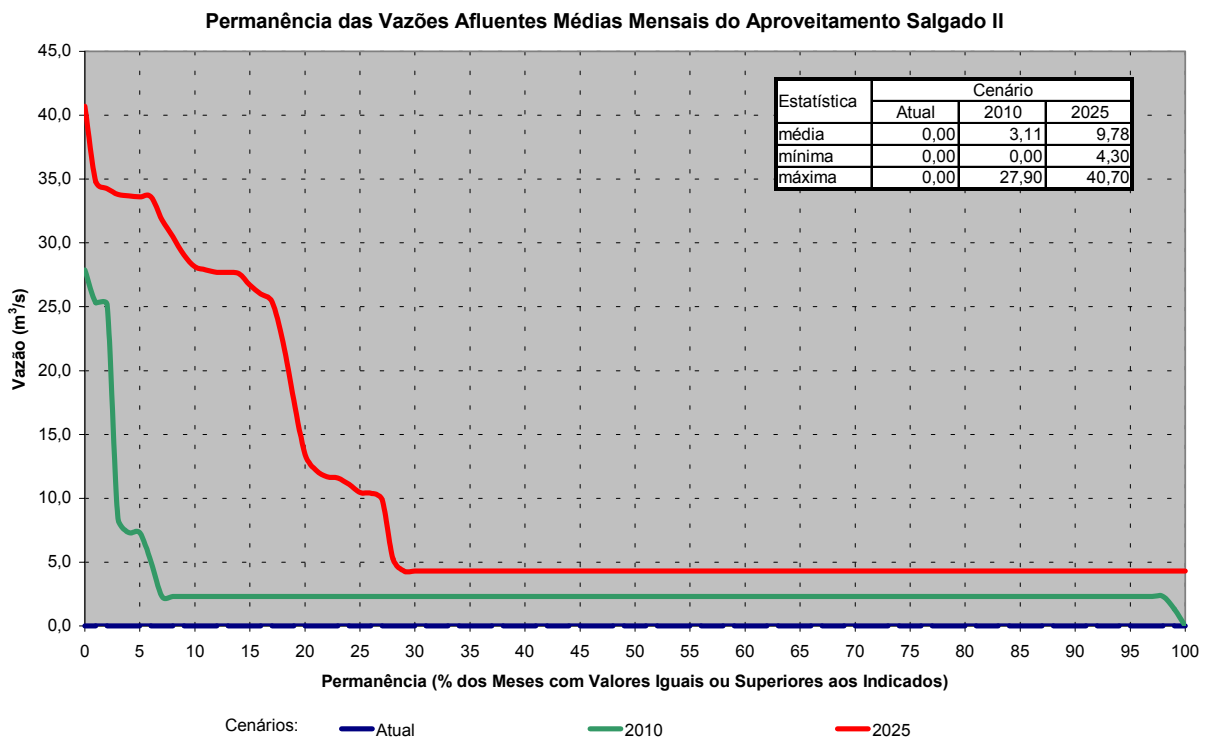


Figura 9.9

As **Figuras 9.10 e 9.11** apresentam as curvas de permanência dos NA dos reservatórios das usinas hidrelétricas Ávidos II e São Gonçalo para os cenários atual, 2.010 e 2.025. Os demais reservatórios não apresentam variações de NA.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

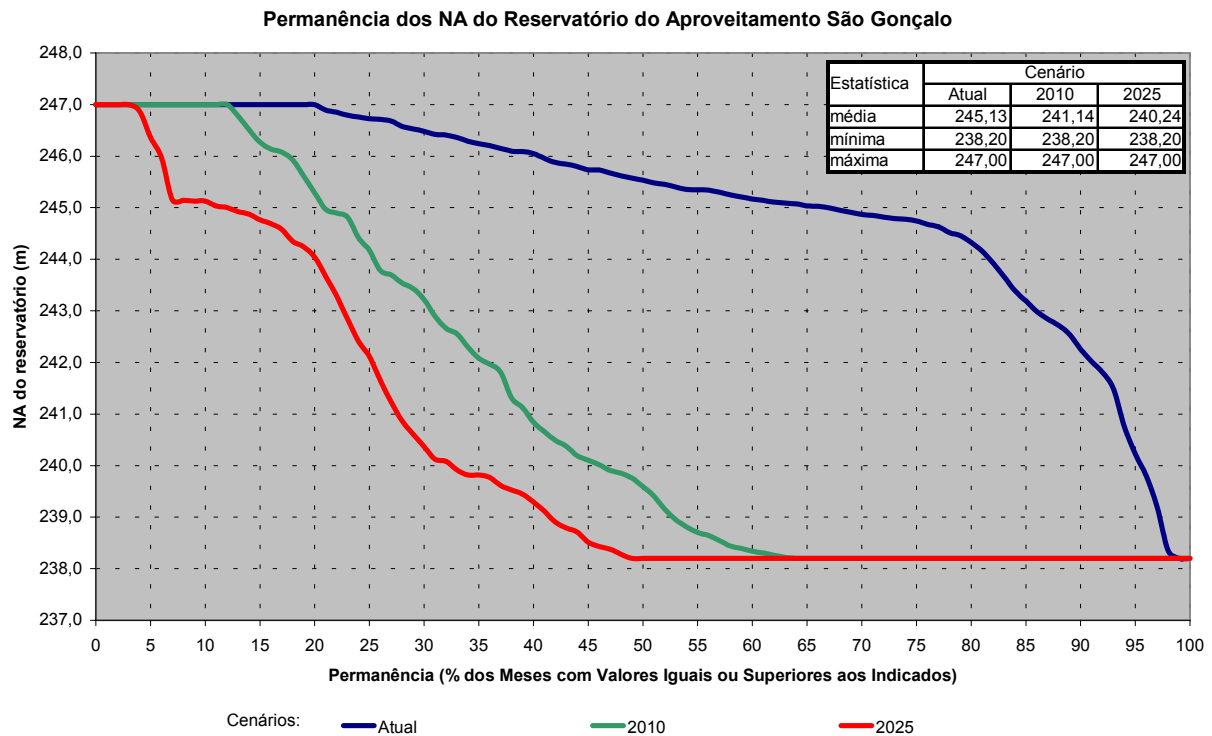


Figura 9.10

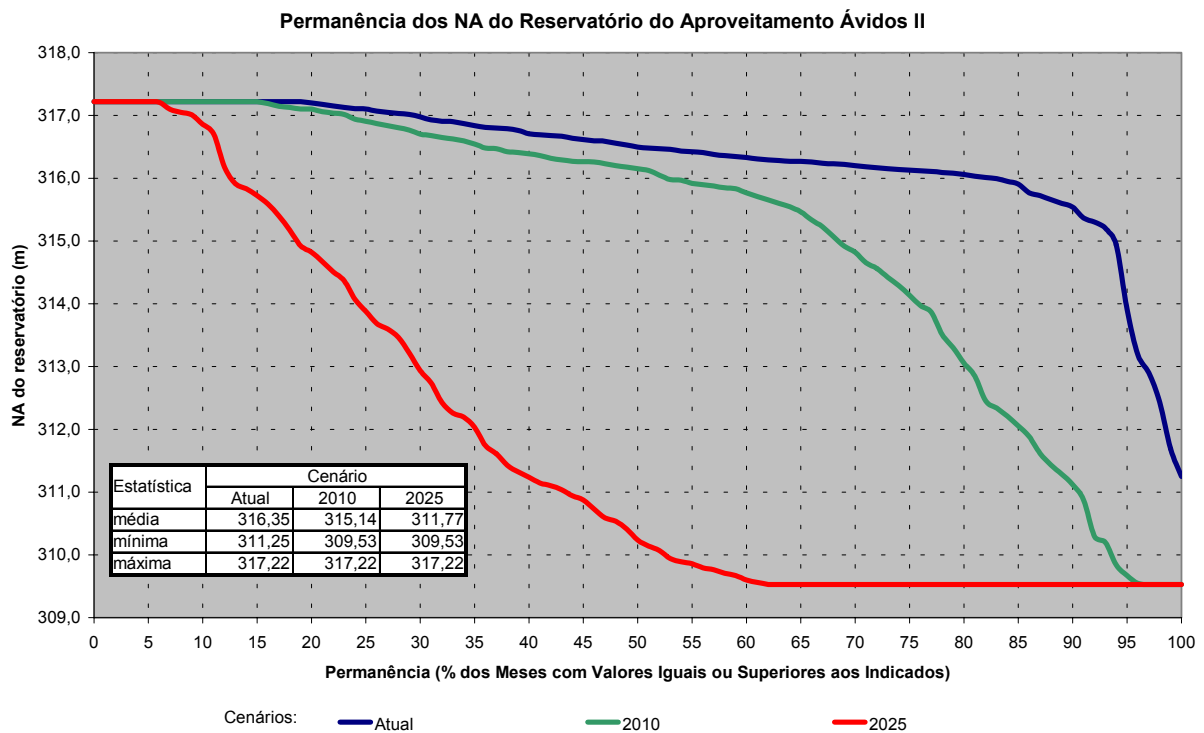


Figura 9.11

As Figuras 9.12 a 9.18 apresentam as curvas de permanência das energias geradas pelas usinas hidrelétricas em estudo, para os cenários atual, 2.010 e 2.025, sem limitações na potência instalada. É importante ressaltar que os valores de energia apresentados consideram



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

as paralisações nos horários de pico do sistema elétrico interligado. A análise destas figuras permite as seguintes conclusões quanto à geração hidrelétrica:

- Nas usinas Ávidos I e Ávidos II é pouco expressiva nos cenários atual e 2.010, com valores significativos em apenas 20 % dos meses;
- Na usina São Gonçalo é pouco expressiva nos cenários atual e 2.010, com valores significativos em apenas 15 % dos meses;
- É nula nas usinas Salgado I e Salgado II no cenário atual, uma vez que a adução para o Trecho III é nula;
- No cenário 2.025, a usina Ávidos I só apresenta geração superior a 31,5 MWmed em 1 % dos meses;
- No cenário 2.025, a usina Ávidos II só apresenta geração superior a 13,4 MWmed em 1% dos meses;
- No cenário 2.025, a usina São Gonçalo só apresenta geração superior a 3,7 MWmed em 2 % dos meses.

Seguindo as diretrizes estabelecidas para este estudo, em particular a de maximizar a geração hidrelétrica do sistema de TRSF, e com base nas análises apresentadas, as potências instaladas preliminares das usinas hidrelétricas são aquelas apresentadas na **Tabela 9.1**.

Aproveitamentos	Potência Instalada (MW)
Jati	49,0
Atalho	19,0
Ávidos I	31,5
Ávidos II	13,4
São Gonçalo	3,7
Salgado	54,0
Salgado I	27,0
Salgado II	27,0
Total:	170,6

Tabela 9.1 – Potência Instalada Preliminar nas Usinas Hidrelétricas



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

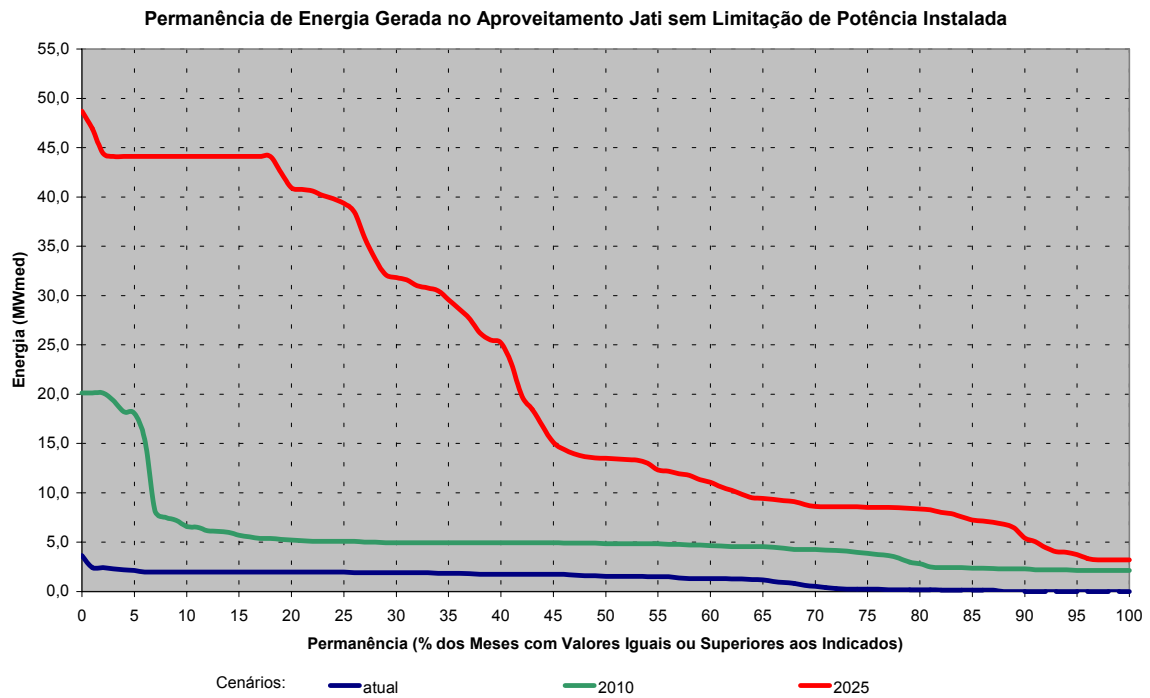


Figura 9.12

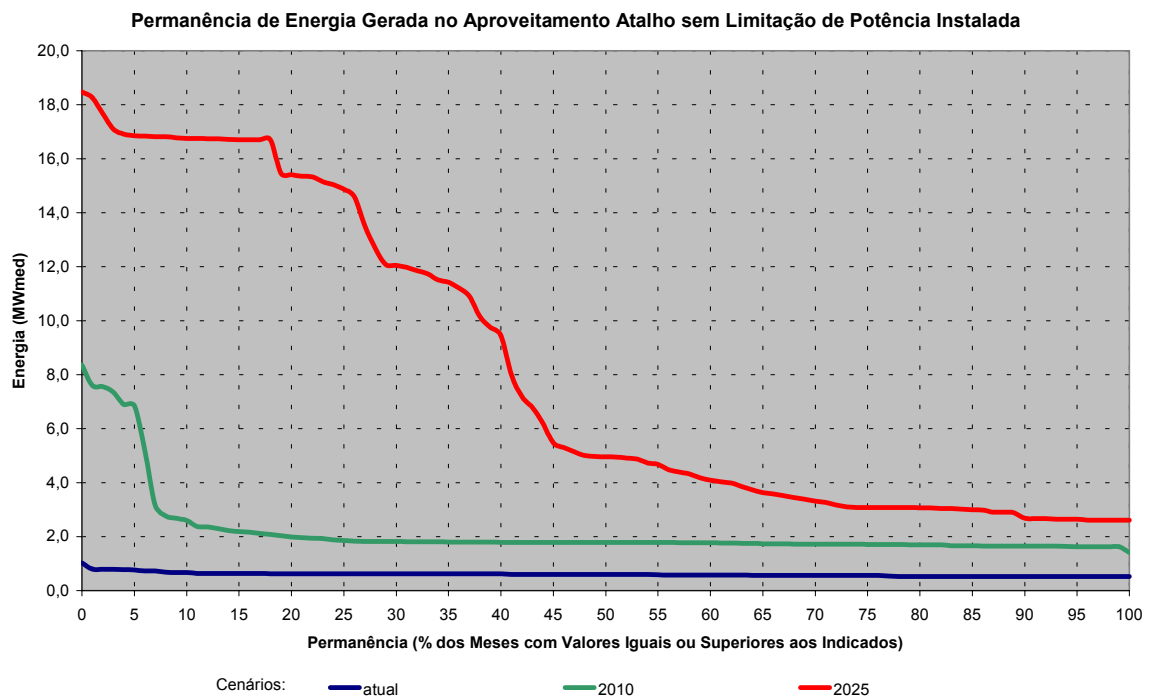


Figura 9.13



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

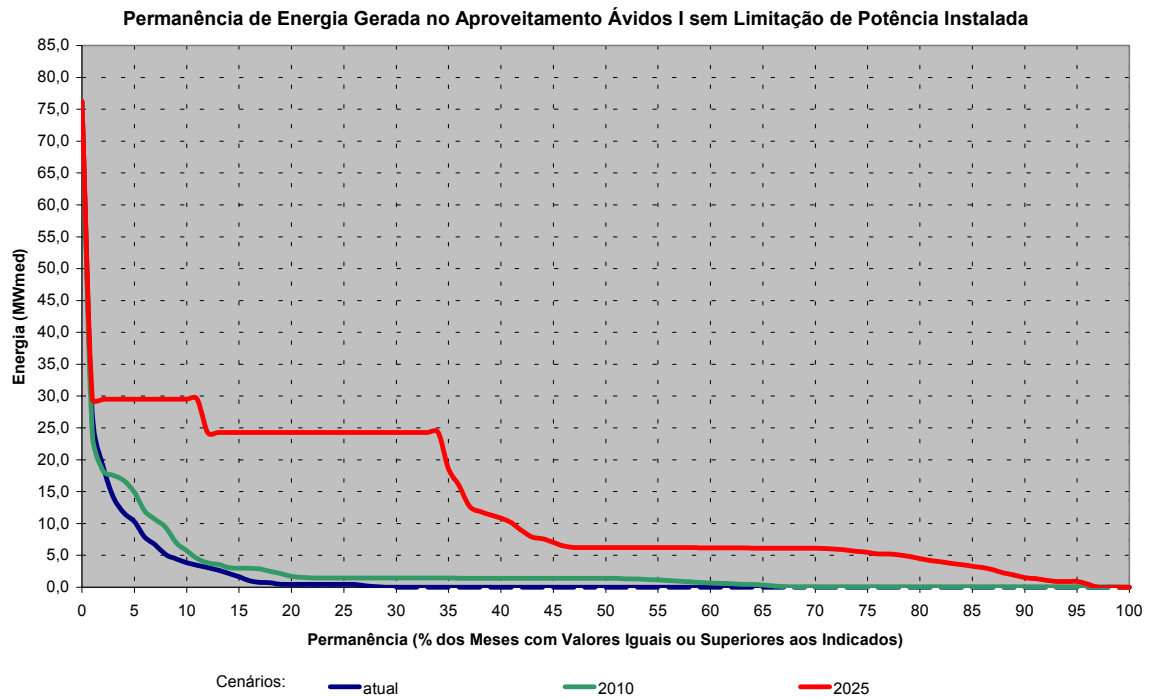


Figura 9.14

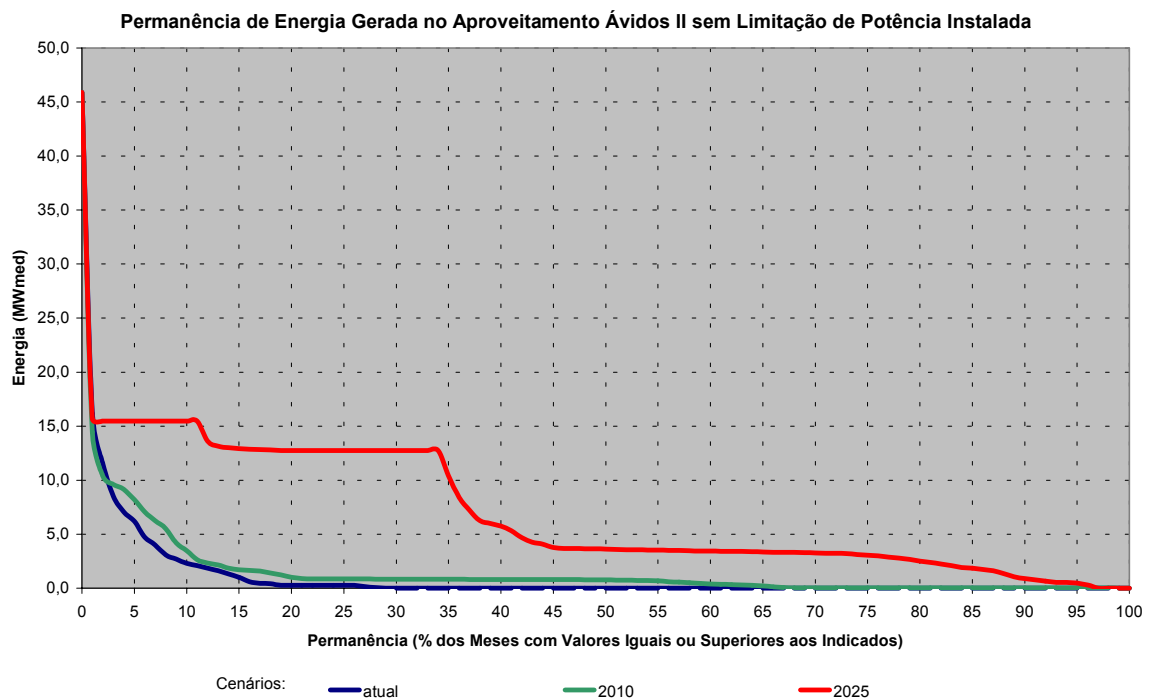


Figura 9.15



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

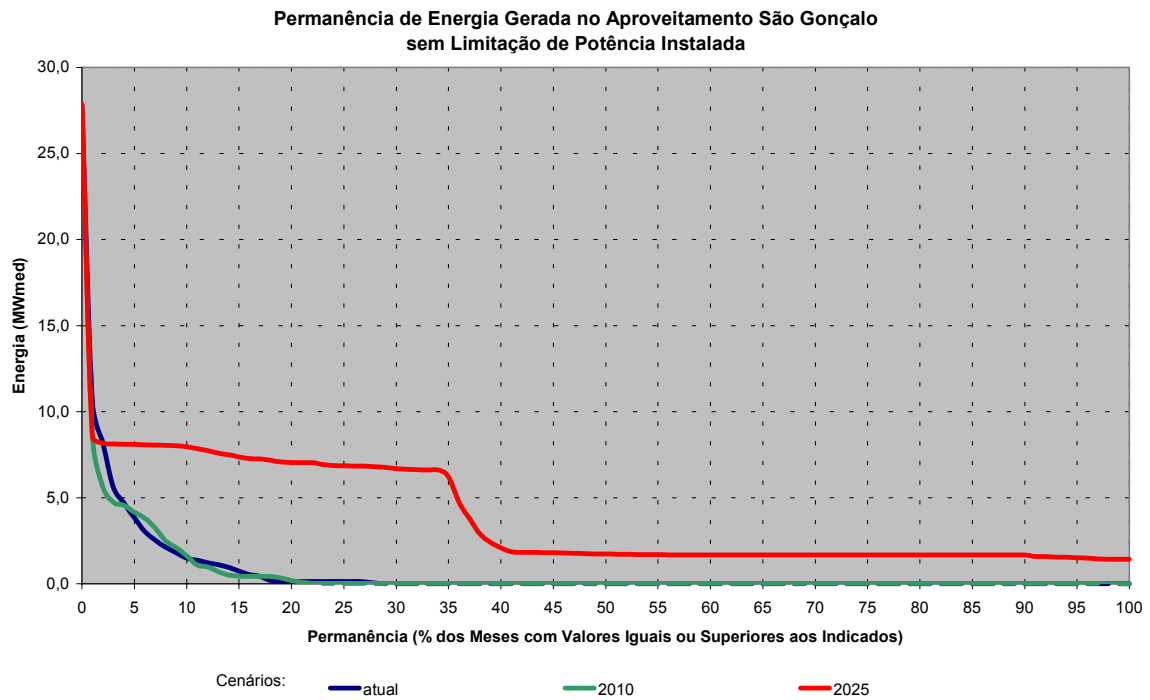


Figura 9.16

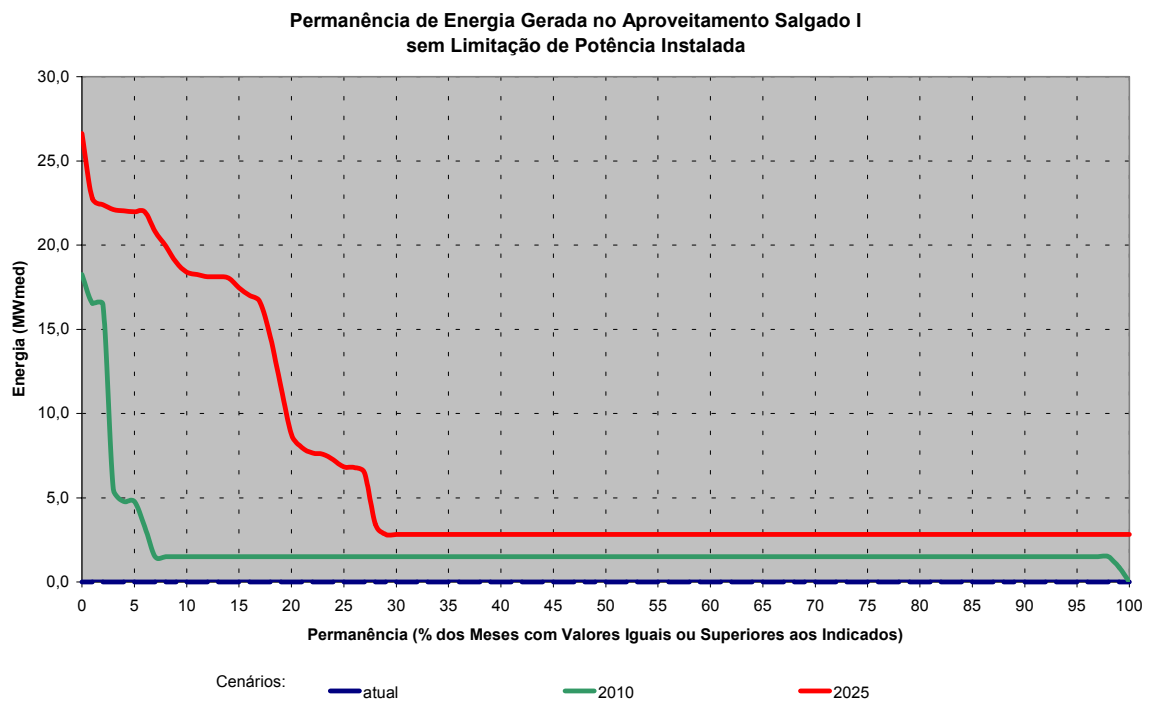


Figura 9.17



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

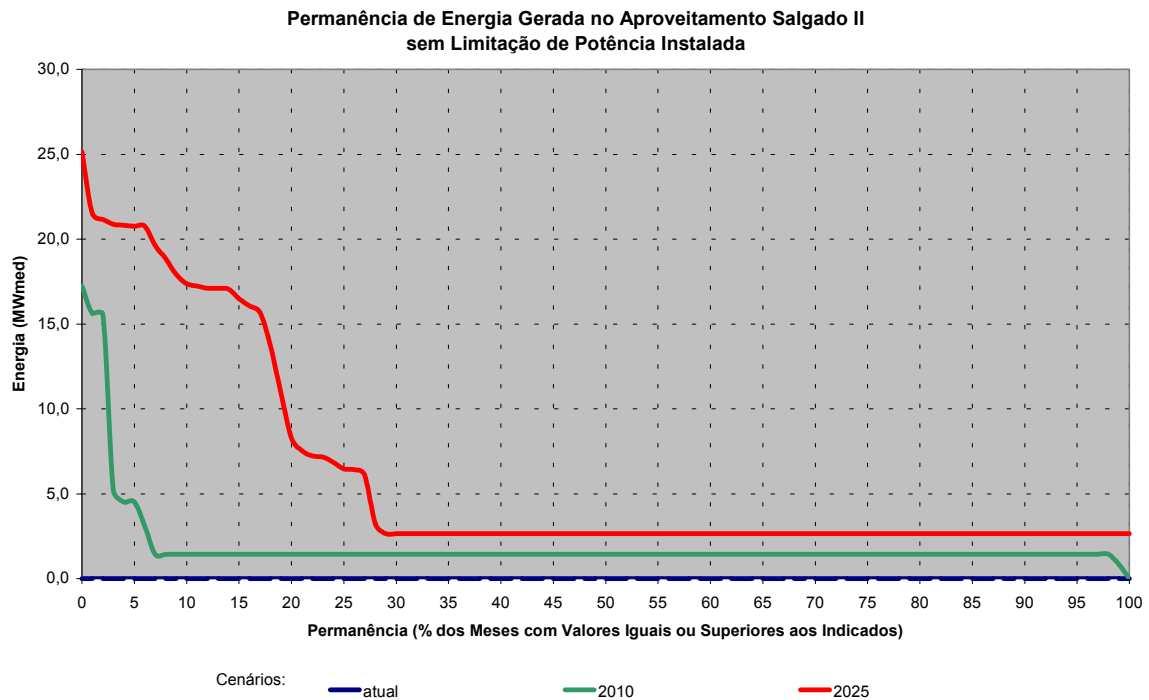


Figura 9.18

9.3.3 Simulações do Sistema com as Potências Instaladas Definidas

Definidas preliminarmente as potências instaladas das usinas, procurou-se determinar as respectivas energias médias produzidas considerando suas potências de geração hidrelétrica. Foram refeitas as simulações do sistema de TRSF utilizando as potências instaladas da **Tabela 9.1**. As **Figuras 9.19 a 9.21** apresentam as curvas de permanência da energia gerada nas usinas Ávidos I, Ávidos II e São Gonçalo, cujas modificações na potência instalada alteraram os resultados.

A **Tabela 2** apresenta a potência instalada e a energia média produzida nos cenários atual, 2.010 e 2.025 para cada usina hidrelétrica. Verifica-se que para o cenário 2.025 o fator de capacidade está entre 23 e 44 %, com média de pouco mais de 37 %. Estes baixos fatores de capacidade resultam da diretriz de maximizar a geração hidrelétrica, conforme explicado anteriormente.

Aproveitamentos	Potência Instalada (MW)	Energia Média Gerada em função do Cenário (MWmed)			Fator de Capacidade Cenário 2025
		Atual	2010	2025	
Jati	49,0	1,25	5,31	21,38	0,44
Atalho	19,0	0,60	2,18	8,22	0,43
Ávidos I	31,5	1,57	2,61	13,53	0,43
Ávidos II	13,4	0,80	1,26	5,93	0,44
São Gonçalo	3,7	0,33	0,28	1,00	0,27
Salgado I	27,0	0,00	2,05	6,47	0,24
Salgado II	27,0	0,00	2,01	6,33	0,23
Total:	170,6	4,5	15,7	62,9	0,37



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Tabela 9.2 – Potência Instalada Preliminar nas Usinas Hidrelétricas

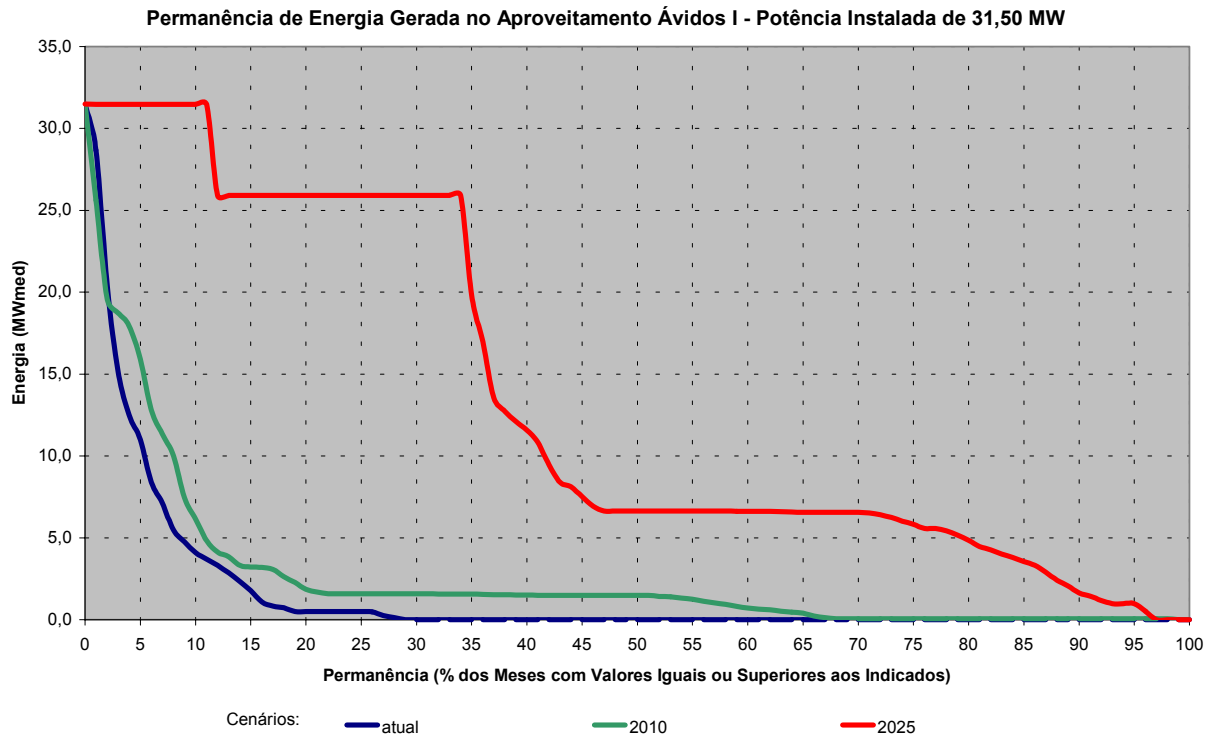


Figura 9.19

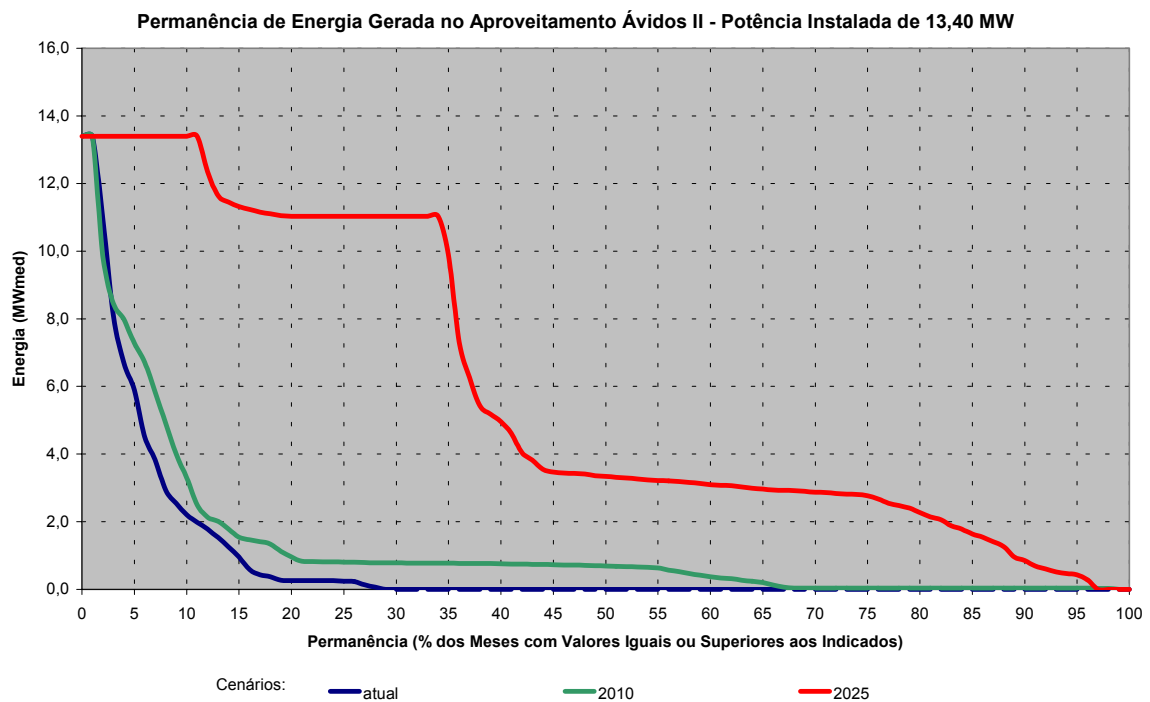


Figura 9.20



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

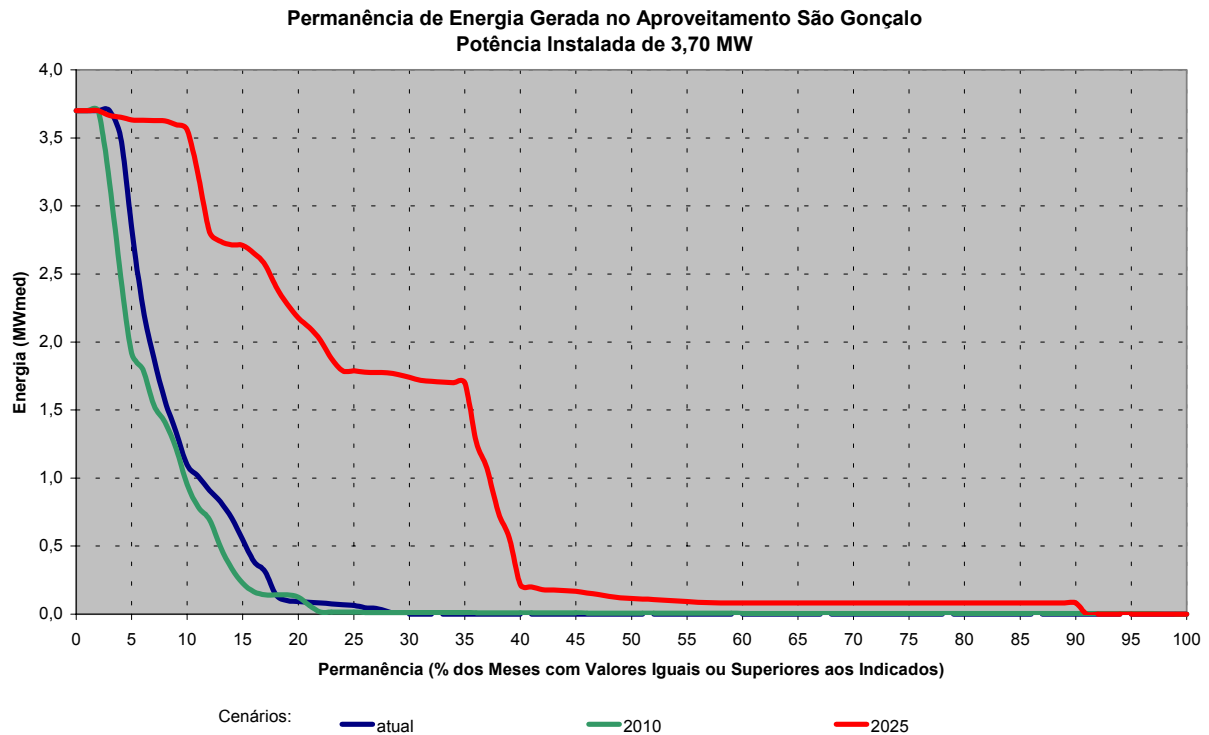


Figura 9.21

As **Figuras 9.22 a 9.28** apresentam as curvas de permanência da energia gerada nas usinas hidrelétricas.

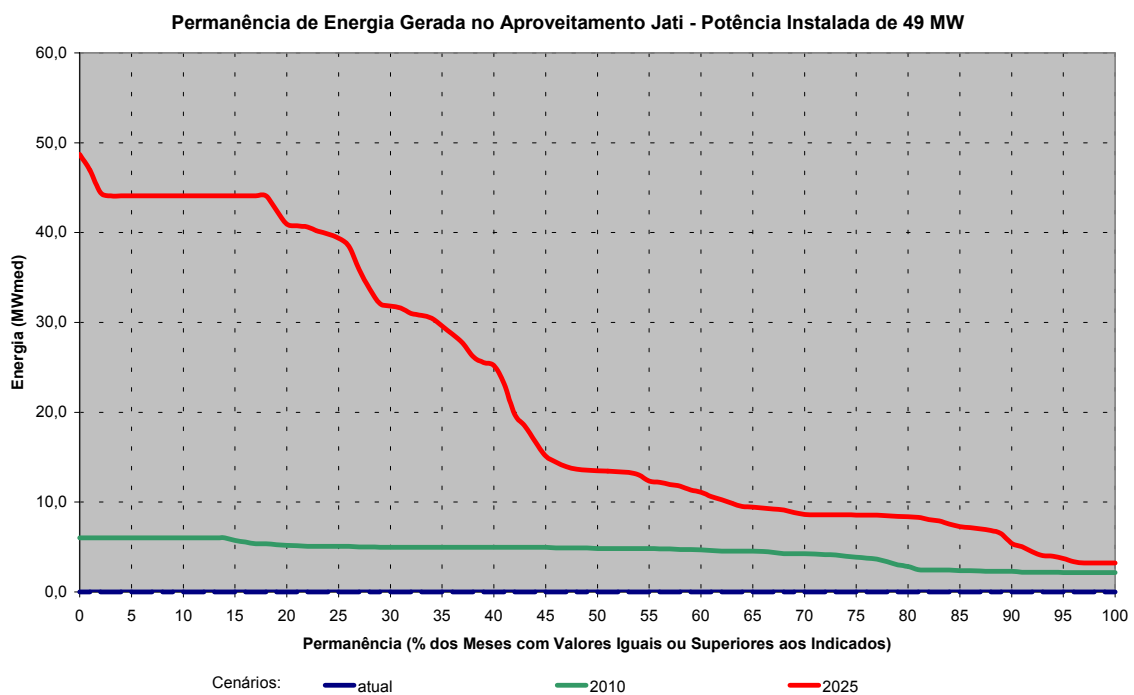


Figura 9.22



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

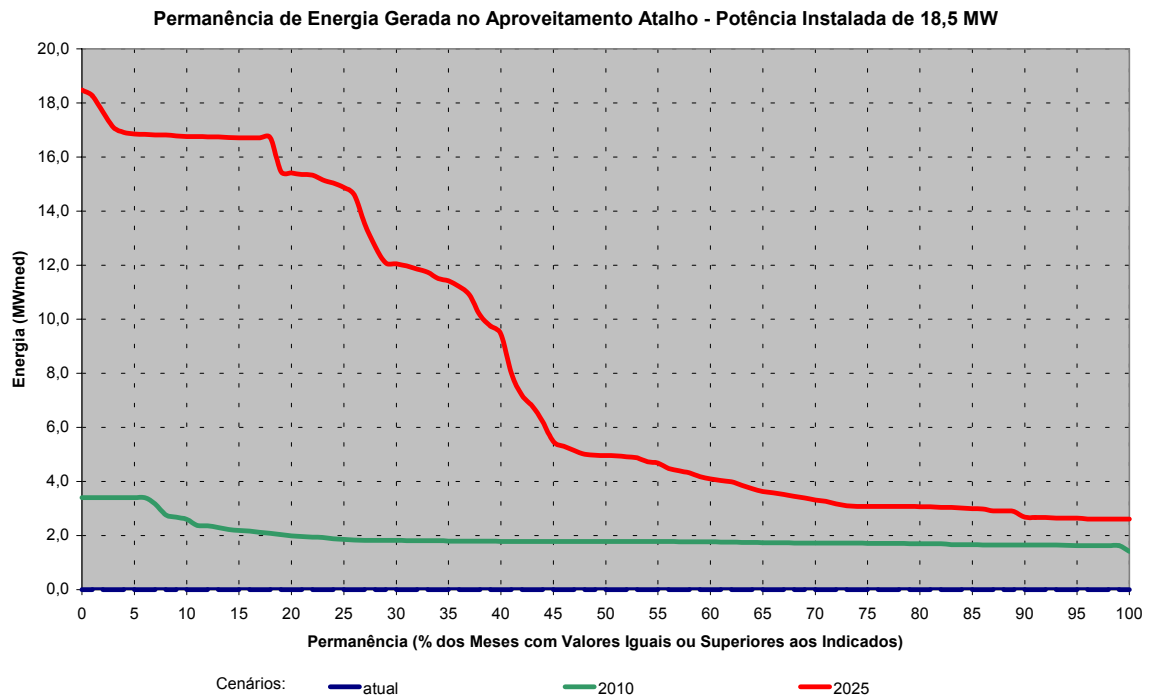


Figura 9.23

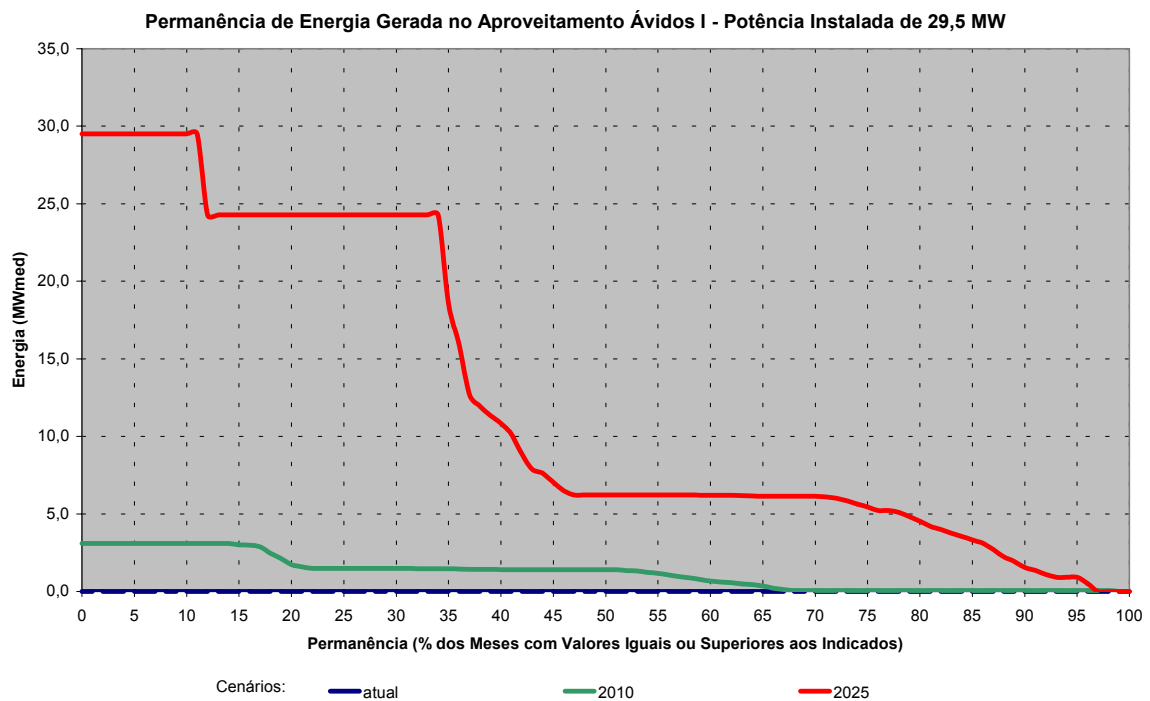


Figura 9.25



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

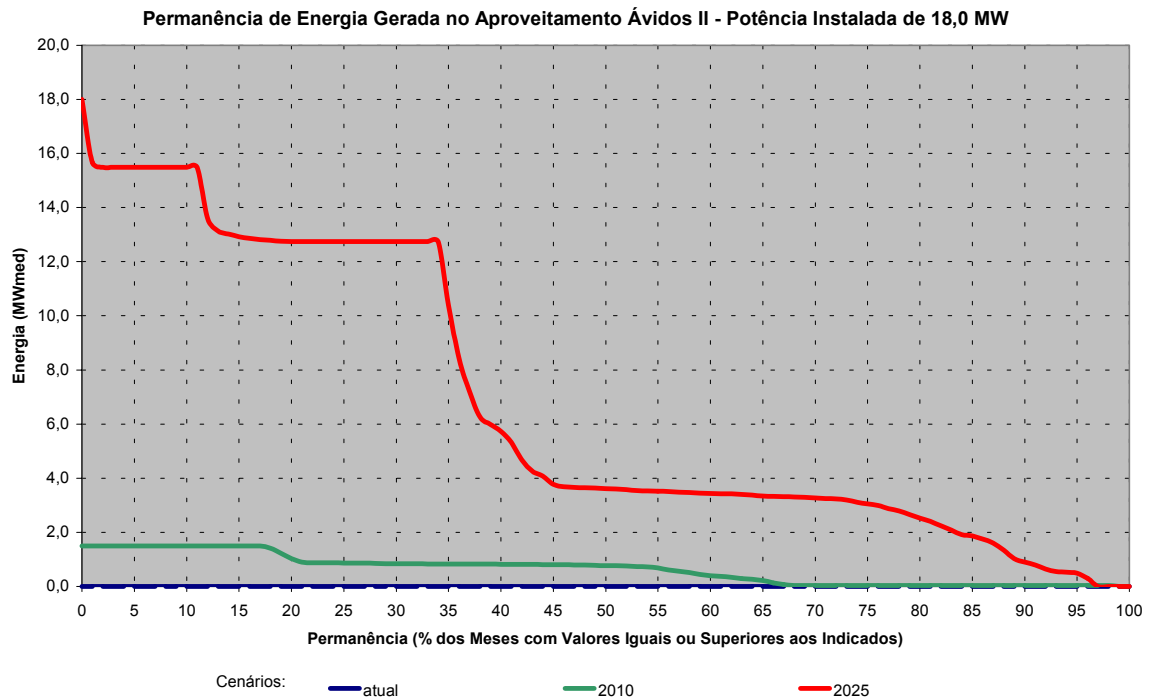


Figura 9.25

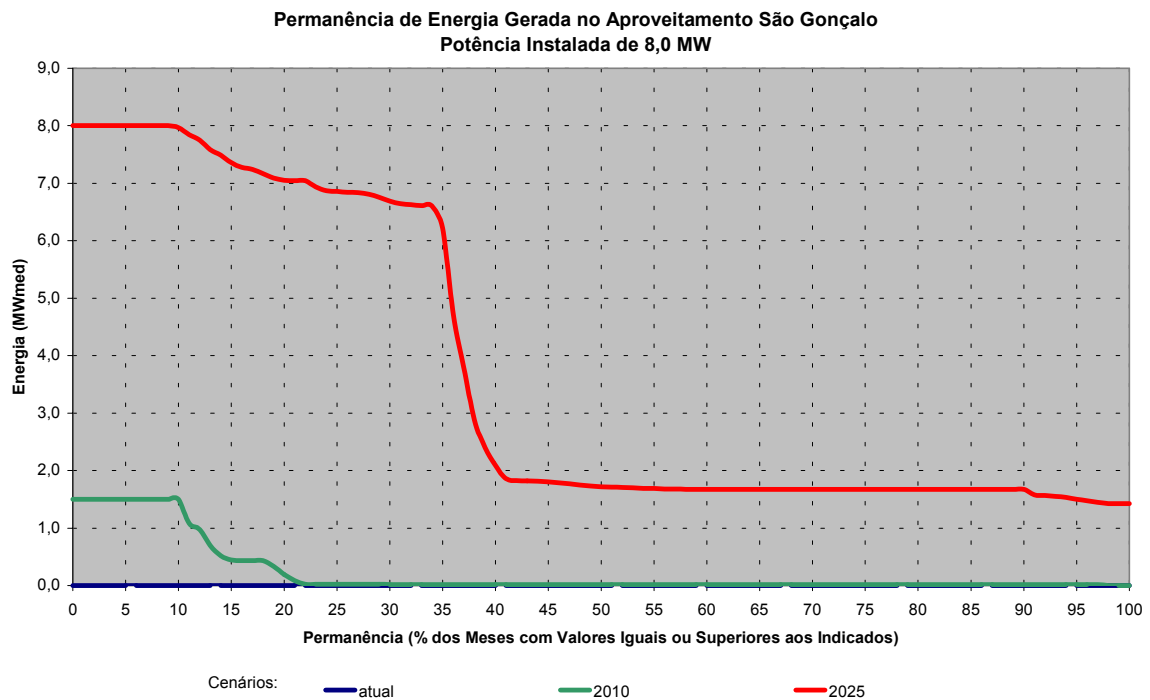


Figura 9.26



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

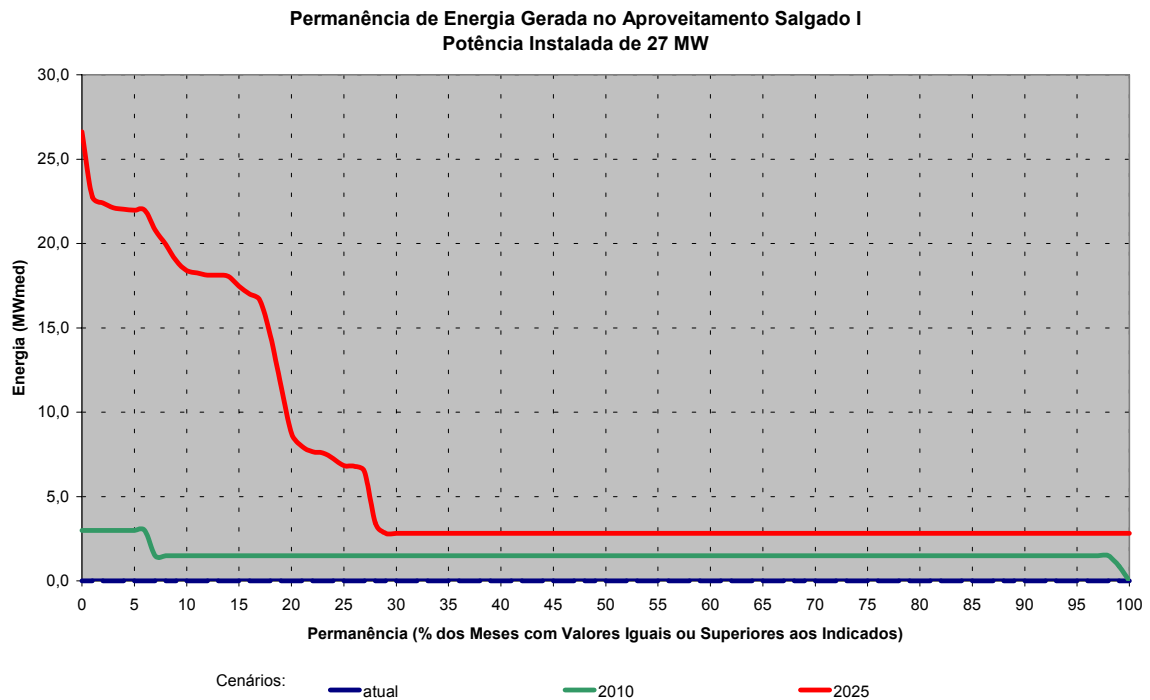


Figura 9.27

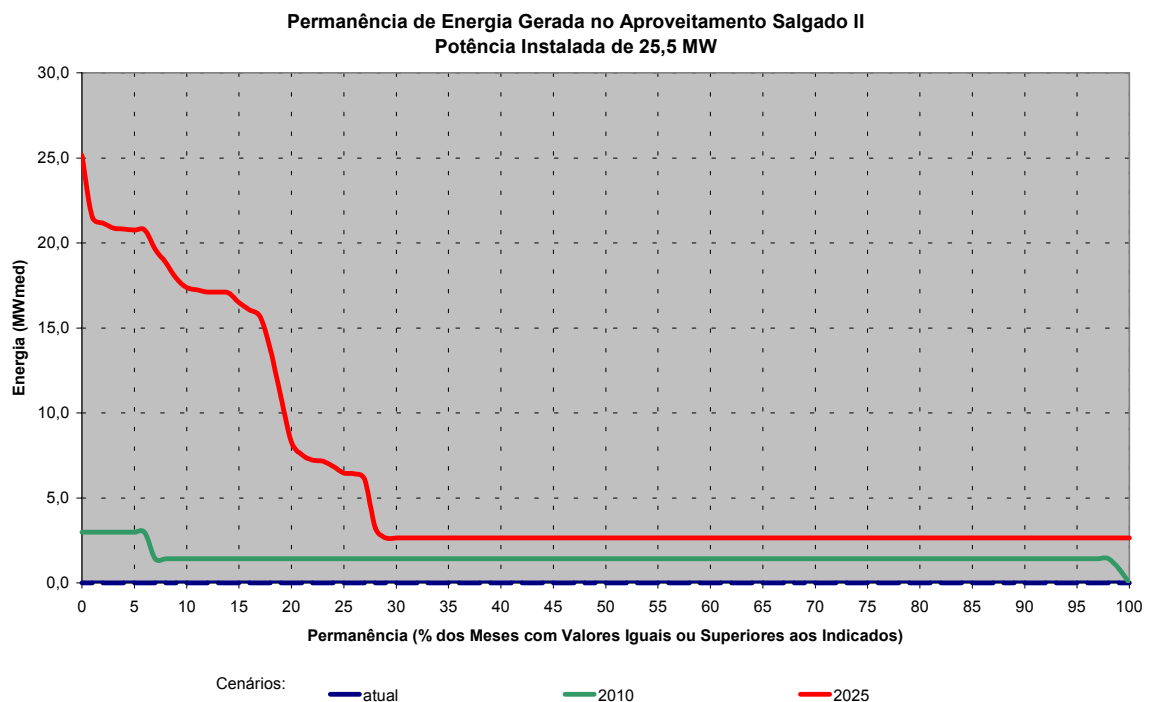


Figura 9.28

A **Tabela 9.3** apresenta, para cada usina hidrelétrica, a potência instalada e a energia média produzida nos cenários atual, 2.010 e 2.025. Na **Tabela 9.3** consta, também, a relação entre a energia gerada para a potência instalada na modulação definida e para a alternativa ideal - sem restrições de operação e de potência instalada, bem como os fatores de capacidade.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Verifica-se que a modulação definida garante a geração integral do potencial energético para o cenário 2.025 indicado pelas simulações sem restrições operativas ou de potência instalada. A exceção é a usina hidrelétrica de São Gonçalo que atinge 98 % do potencial. Para o cenário denominado atual a geração é inexpressiva para viabilizar a motorização. Já no cenário 2.010, atinge-se entre 78 e 89 % do potencial energético, com exceção das usinas hidrelétricas Ávidos I e Ávidos II que ficam limitadas em 43 e 46 %, respectivamente, e do aproveitamento São Gonçalo com geração inexpressiva.

Usinas Hidrelétricas	Cenários	Alternativas de Motorização	Energia Média (MWmed)	Energia Média sem restrições (MWmed)	Relação Energia Gerada / Energia Gerada sem Restrições (%)
Jati	atual	a geração é inexpressiva para motorização		1,25	
	2010	1 x 7,50 MW	3,39	5,31	64%
	2025	3 x 16,50 MW	20,43	21,38	96%
	2025	4 x 12,50 MW	21,00	21,38	98%
	2025	5 x 10 MW	21,10	21,38	99%
Atalho	atual	a geração é inexpressiva para motorização		0,60	
	2010	1 x 3,33 MW	2,18	3,40	64%
	2025	3 x 6,10 MW	7,77	8,22	95%
	2025	4 x 5,00 MW	8,22	8,22	100%
	2025	5 x 3,80 MW	8,22	8,22	100%
Ávidos I	atual	a geração é inexpressiva para motorização		1,57	
	2010	a geração é inexpressiva para motorização		2,61	
	2025	3 x 11 MW	13,00	13,53	96%
	2025	4 x 8 MW	13,27	13,53	98%
	2025	5 x 6,50 MW	13,37	13,53	99%
Ávidos II	atual	a geração é inexpressiva para motorização		0,80	
	2010	a geração é inexpressiva para motorização		1,26	
	2025	3 x 4,55 MW	5,80	5,93	98%
	2025	4 x 3,45 MW	5,85	5,93	99%
	2025	5 x 2,80 MW	5,89	5,93	99%
São Gonçalo	atual	a geração é inexpressiva para motorização		0,33	
	2010	a geração é inexpressiva para motorização		0,28	
	2025	2 x 2,00 MW	0,95	1,00	95%
	2025	3 x 1,30 MW	0,95	1,00	95%
	2025	4 x 0,90 MW	0,95	1,00	95%
Salgado I	atual	a geração é inexpressiva para motorização		0,00	
	2010	1 x 3,04 MW	1,40	2,05	68%
	2025	2 x 13,6 MW	4,36	6,47	67%
	2025	3 x 9,0 MW	4,41	6,47	68%
	2025	4 x 5,7 MW	6,01	6,47	93%
Salgado II	atual	a geração é inexpressiva para motorização		0,00	
	2010	1 x 3 MW	1,37	2,01	68%
	2025	2 x 13,2 MW	4,26	6,33	67%
	2025	3 x 8,8 MW	4,31	6,33	68%
	2025	4 x 5,9 MW	5,88	6,33	93%

Tabela 9.3 – Modulação Fixa das Usinas Hidrelétricas

9.4 Definição da Potência Instalada e Modulação das Usinas

9.4.1 Metodologia

Neste item apresenta-se um detalhamento da metodologia específica utilizada para estabelecer a modulação das máquinas para a potência instalada pré-definida.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

A **Figura 9.29** apresenta uma curva de permanência da energia gerada por uma usina hidrelétrica qualquer, em um dos cenários de estudo. Na abcissa está a frequência acumulada ou a porcentagem dos meses em que a energia é igual ou superior ao valor indicado. Na ordenada é apresentada a energia gerada no período de produção, ou seja, desconsiderando os horários de ponta do sistema quando o bombeamento é interrompido. O valor máximo da produção energética, correspondente à potência instalada, é indicado por $E_{m\acute{a}x}$, enquanto o valor mínimo recebe a simbologia de $E_{m\acute{i}n}$. De forma geral, para cada frequência acumulada f_i corresponde um valor de energia E_i .

A integral da curva de permanência representa a energia média gerada (E_{med}). Para atender a diretriz de projeto, a modulação das máquinas deve propiciar a maximização da energia produzida. Discretizando a integral em somatória de n pequenos intervalos de frequência acumulada f_i aos quais correspondem valores de energia E_i , a função objetivo para a modulação das máquinas é:

$$\text{Maximizar } \left[\sum_{i=0}^n E_i \cdot f_i \right] \quad (1)$$

O parâmetro E_o é o menor valor de energia que pode ser gerado pela modulação adotada. Este valor corresponde ao limite inferior de produção de energia da máquina de menor potência a ser instalada para aquela alternativa de modulação.

Para uma máquina com potência instalada P_i , a máxima geração E_{max_i} corresponde, numericamente, ao valor P_i enquanto a mínima E_{min_i} resulta das características mecânicas da turbina. Atribuindo-se o coeficiente k à relação entre os valores mínimos E_{min_i} e máximos E_{max_i} de geração, tem-se que o parâmetro E_o resulta em:

$$E_o = k \cdot [\text{Mínimo } (E_{max_i})_{i=1 \text{ até } N}] \quad (2)$$

onde N é o número de máquinas da alternativa de modulação.

Portanto, para uma alternativa de modulação com N máquinas com potências diferentes P_i , a faixa coberta para fins de geração estende-se de:

Faixa de Geração da Alternativa de Modulação:

Mínima: E_o

Máxima: $\sum P_i$, com i variando de 1 a N . (3)

Por sua vez, a capacidade de geração de cada máquina de potência instalada P_i é:

Faixa de Geração da Máquina i :

Mínima: $k \cdot P_i$

Máxima: P_i . (4)

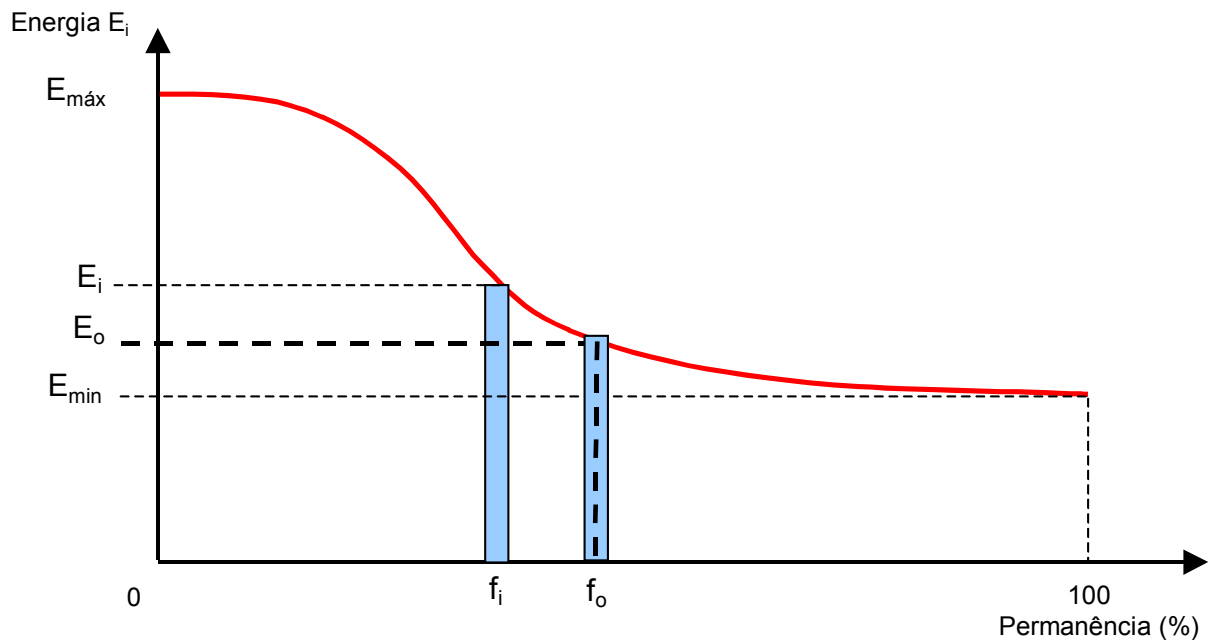


Figura 9.29

Desta forma, para uma usina hidrelétrica com uma dada curva de permanência de energia e uma alternativa composta de N máquinas, a potência instalada ótima do conjunto torna-se um problema de programação linear com o objetivo descrito pela equação (1), sujeito às restrições representadas pelas equações (3) e (4).

9.4.2 Análise da Modulação Fixa

Inicialmente, o modelo de programação linear descrito anteriormente foi aplicado considerando uma modulação fixa, ou seja, todas as máquinas têm a mesma potência. Esta análise inicial foi desenvolvida para alternativas com 2 a 5 máquinas em cada usina hidrelétrica, privilegiando o cenário de 2025. O objetivo inicial foi verificar a produção energética das usinas hidrelétricas nesta modulação ideal para fins de implantação, operação e a manutenção. No entanto, esta modulação não é adequada para os cenários atual e 2010, uma vez que limitaria muito a produção energética e/ou não permitiria geração alguma. Além disso, as limitações da faixa de geração das máquinas podem levar a uma produção energética muito aquém do desejado.

Os estudos energéticos preliminares que constam do relatório “Otimização Energética dos Trechos II e III – Ficha Técnica”, de Janeiro de 2003, resultaram em um pré-dimensionamento das unidades. Com base nestes dados, foram definidos os coeficientes “ k ” de cada usina hidrelétrica que representam a relação entre os valores mínimos E_{min} e máximos E_{max} de geração. Os valores dos coeficientes são apresentados na **Tabela 9.4**, ordenada pela queda bruta. Percebe-se que as usinas de baixa queda permitem uma maior amplitude na faixa de geração, chegando em até 30 % da potência instalada.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Aproveitamentos	Queda Bruta (m)	Coefficiente k
São Gonçalo	14,62	0,30
Atalho	23,54	0,45
Ávidos II	37,22	0,45
Jati	61,72	0,50
Salgado II	69,33	0,50
Ávidos I	69,36	0,50
Salgado I	70,84	0,50

Tabela 9.4 - Relação entre os Valores Mínimos e Máximos de Geração

A aplicação do modelo de programação linear considerando os coeficientes da **Tabela 9.3** e as alternativas de 2 a 5 máquinas, resultou na modulação apresentada na **Tabela 9.4**. A análise dos resultados permite verificar a necessidade de um maior número de máquinas nas usinas hidrelétricas Salgado I e Salgado II, de forma a garantir uma produção energética próxima àquela que se obteria sem limitações de potência instalada.

9.4.3 Determinação da Modulação Ótima

Finalmente, o modelo de programação linear descrito anteriormente foi aplicado buscando a modulação ótima, que procura maximizar a geração hidrelétrica no cenário 2025 e garantir ainda a produção energética nos cenários atual e 2010. Foram desenvolvidas análises através da aplicação do modelo para até 5 máquinas em cada usina hidrelétrica. Os valores dos coeficientes “k” de cada usina hidrelétrica que representam a relação entre os valores mínimos Emin e máximos Emax de geração são os mesmos apresentados na **Tabela 9.4**.

A aplicação do modelo de programação linear considerando os coeficientes da **Tabela 9.4** e as alternativas de 2 a 5 máquinas, resultou na modulação apresentada na **Tabela 9.5**. A **Tabela 9.5** apresenta, também, a relação entre a energia gerada para a modulação ótima e para a alternativa ideal - sem restrições de operação e de potência instalada, bem como os fatores de capacidade.

Verifica-se que a modulação obtida garante, na maioria das usinas hidrelétricas, a geração integral do potencial energético para o cenário 2025 indicado pelas simulações sem restrições operativas ou de potência instalada. A exceção é a usina hidrelétrica de São Gonçalo que atinge 95 % do potencial. Para o cenário denominado atual a geração é inexpressiva para viabilizar a motorização. Já no cenário 2010, atinge-se entre 61 e 68 % do potencial energético, com exceção das usinas hidrelétricas Ávidos I e Ávidos II que ficam limitadas em 21 e 25 %, respectivamente, e do aproveitamento São Gonçalo com geração inexpressiva.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Usinas Hidrelétricas	Cenários	Alternativas de Motorização	Potência Total (MW)	Energia Média (MWmed)	Energia Média sem restrições (MWmed)	Relação Energia Gerada / Energia Gerada sem Restrições (%)	Fator de Capacidade
Jati	atual	a geração é inexpressiva para motorização			1,25		
	2010	1 x 6,50 MW	6,50	3,22	5,31	61%	49,5%
	2025	1 x 6,50 MW, 1 x 13 MW e 1 x 30 MW	49,50	21,29	21,38	100%	43,0%
	2025	1 x 6,50 MW, 2 x 13 MW e 1 x 17 MW	49,50	21,29	21,38	100%	43,0%
Atalho	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,60		
	2010	1 x 3,40 MW	3,40	2,18	3,40	64%	64,1%
	2025	1 x 3,40 MW, 2 x 7,55 MW	18,50	8,22	8,22	100%	44,4%
Avidos I	atual	a geração é inexpressiva para motorização			1,57		
	2010	a geração é inexpressiva para motorização			2,61		
	2025	3 x 11 MW	33,00	13,00	13,53	96%	39,4%
	2025	4 x 8 MW	32,00	13,27	13,53	98%	41,5%
	2025	5 x 6,50 MW	32,50	13,37	13,53	99%	41,1%
OU							
Avidos I	atual	a geração é inexpressiva para motorização			1,57		
	2010	1 x 3 MW	3,00	0,54	2,61	21%	18,0%
	2025	1 x 3 MW, 3 x 11 MW	36,00	13,46	13,53	99%	37,4%
	2025	1 x 3 MW, 4 x 8 MW	35,00	13,46	13,53	99%	38,5%
	2025	1 x 3 MW, 5 x 6,50 MW	35,50	13,46	13,53	99%	37,9%
Avidos II	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,80		
	2010	a geração é inexpressiva para motorização			1,26		
	2025	3 x 4,55 MW	13,65	5,80	5,93	98%	42,5%
	2025	4 x 3,45 MW	13,80	5,85	5,93	99%	42,4%
	2025	5 x 2,80 MW	14,00	5,89	5,93	99%	42,1%
OU							
Avidos II	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,80		
	2010	1 x 1,5 MW	1,50	0,31	1,26	25%	20,7%
	2025	1 x 1,5 MW, 3 x 4,55 MW	15,15	5,91	5,93	100%	39,0%
	2025	1 x 1,5 MW, 4 x 3,45 MW	15,30	5,91	5,93	100%	38,6%
	2025	1 x 1,5 MW, 5 x 2,80 MW	15,50	5,91	5,93	100%	38,1%
São Gonçalo	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,33		
	2010	a geração é inexpressiva para motorização			0,28		
	2025	2 x 2,00 MW	4,00	0,95	1,00	95%	23,8%
	2025	3 x 1,30 MW	3,90	0,95	1,00	95%	24,4%
	2025	4 x 0,90 MW	3,60	0,95	1,00	95%	26,4%
Salgado I	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,00		
	2010	1 x 3 MW	3,00	1,40	2,05	68%	46,7%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 6 MW e 1 x 18 MW	27,00	6,47	6,47	100%	24,0%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 6 MW e 2 x 9 MW	27,00	6,47	6,47	100%	24,0%
	2025	1 x 3 MW, 4 x 6 MW	27,00	6,47	6,47	100%	24,0%
Salgado II	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,00		
	2010	1 x 3 MW	3,00	1,37	2,01	68%	45,7%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 6 MW e 1 x 18 MW	27,00	6,33	6,33	100%	23,4%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 6 MW e 2 x 9 MW	27,00	6,33	6,33	100%	23,4%
	2025	1 x 3 MW, 4 x 6 MW	27,00	6,33	6,33	100%	23,4%

Tabela 9.5 – Modulação Ótima das Usinas Hidrelétricas

Por fim, a partir da modulação ótima, feito o desenvolvimento geométrico final e calculadas todas condições hidráulicas de escoamento e transientes correspondentes, chegou-se à situação final mostrada na **Tabela 9.6**, que consolida os dados deste estudo com as condições de projeto.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Usinas Hidrelétricas	Cenários	Alternativas de Motorização	Potência Total (MW)	Energia Média (MWmed)	Energia Média sem restrições (MWmed)	Relação Energia Gerada / Energia Gerada sem Restrições (%)	Fator de Capacidade
Jati	atual	a geração é inexpressiva para motorização			1,25		
	2010	1 x 6,00 MW	6,00	4,42	5,31	83	73,7%
	2025	1 x 6,00 MW, 2 x 13 MW e 1 x 17 MW	49,00	21,38	21,38	100	43,6%
Atalho	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,60		
	2010	1 x 3,40 MW	3,40	1,94	2,18	89	57,1%
	2025	1 x 3,40 MW, 2 x 7,55 MW	18,50	8,22	8,22	100	44,4%
Ávidos I	atual	a geração é inexpressiva para motorização			1,65		
	2010	1 x 3,1 MW	3,10	1,19	2,60	46	38,5%
	2025	1 x 3,1 MW, 3 x 8,8 MW	29,50	12,67	12,78	99	43,0%
Ávidos II	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,99		
	2010	1 x 1,5 MW	1,50	0,64	1,50	43	42,6%
	2025	1 x 1,5 MW, 3 x 5,5 MW	18,00	6,78	6,84	99	37,7%
São Gonçalo	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,64		
	2010	1 x 1,5 MW	1,50	0,23	0,60	38	15,3%
	2025	2 x 1,5, 1 x 2,5, 1 x 4 MW	8,00	3,75	3,81	98	46,8%
Salgado I	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,00		
	2010	1 x 3 MW	3,00	1,58	2,03	78	52,8%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 6 MW e 2 x 9 MW	27,00	6,40	6,40	100	23,7%
Salgado II	atual	a geração é inexpressiva para motorização			0,00		
	2010	1 x 3 MW	3,00	1,51	1,92	79	50,2%
	2025	1 x 3 MW, 1 x 5,5 MW e 2 x 8,5 MW	25,50	6,04	6,04	100	23,7%

Tabela 9.6 – Síntese dos resultados das simulações

9.5 Balanço Energético

Para proceder o balanço energético do projeto de TRSF, foram consideradas as alternativas de modulação das usinas que resultassem na máxima produção energética. No caso dos aproveitamentos previstos para o Trecho III, optou-se por considerar a alternativa com divisão de queda, ou seja, com as usinas Salgado I e Salgado II. Quanto ao consumo de energia foram utilizados os dados das estações de bombeamento do Eixo Norte, apresentados na **Tabela 9.7**.

Parâmetros	EBI-1	EBI-2	EBI-3
Altura Geométrica (m)	35,52	55,10	89,55
Vazão de Projeto (m ³ /s)	99	99	89
rendimento (%)	83,0%	83,0%	83,0%
perda de carga (%)	3,00%	3,00%	3,00%
Potência (MW)	44	68	100

Tabela 9.7 – Dados das Estações de Bombeamento do Eixo Norte

Para cada mês do período de Janeiro de 1931 a Dezembro de 1990 foram obtidos os valores de geração através da soma das energias produzidas pelas usinas hidrelétricas Jati, Atalho, Ávidos I, Ávidos II, São Gonçalo, Salgado I e Salgado II. Por sua vez, a energia requerida no Eixo Norte foi obtida pela soma da energia necessária nas estações de bombeamento EBI-1, EBI-2 e EBI-3.

A **Tabela 9.8** apresenta um resumo estatístico da energia gerada, da energia requerida e do balanço energético. As **Figuras 9.30** e **9.31** apresentam as curvas de permanência das energias



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

gerada e requerida e do balanço energético, respectivamente. O balanço energético considerou a possibilidade ou não de comercialização do superávit ou de sua compensação com a concessionária local. No caso de haver superávit de geração hidrelétrica no Eixo Norte a energia poderia ser utilizada no Eixo Leste ou fornecida para a concessionária. No entanto, devido a pouca frequência destas ocorrências de superávit, esta energia poderia não ser comercializada, caso representado pelo “balanço sem venda”.

A energia média gerada é de 63,0 MWmed, enquanto a energia requerida média no Eixo Norte é de 101,8 MWmed. O balanço energético indica um déficit médio de 39,2 MWmed. O máximo déficit chega a 88,5 MWmed, enquanto o superávit máximo chega a 42,9 MWmed. O balanço energético indica, ainda, que em 96 % dos meses o Eixo Norte estará em déficit.

Estatística	Energia (MWmed)			
	Energia Gerada	Energia Requerida	Balanço	Balanço sem Venda
média	63,0	101,8	-38,8	-39,2
máximo	159,8	210,5	42,9	0,0
mínimo	11,5	17,2	-88,5	-88,5
Permanência (%)				
0	159,8	210,5	42,9	0,0
5	143,2	201,0	-5,6	-5,6
10	135,0	201,0	-10,5	-10,5
15	117,4	201,0	-12,1	-12,1
20	110,4	187,7	-16,8	-16,8
25	100,6	180,7	-20,3	-20,3
30	95,2	148,8	-23,2	-23,2
35	88,9	136,2	-24,9	-24,9
40	77,1	112,7	-26,6	-26,6
45	43,3	74,7	-29,9	-29,9
50	35,0	70,6	-33,6	-33,6
55	33,4	63,5	-37,5	-37,5
60	30,7	56,1	-40,7	-40,7
65	28,1	52,3	-47,3	-47,3
70	27,4	50,9	-55,4	-55,4
75	27,0	45,7	-59,8	-59,8
80	26,1	40,4	-64,4	-64,4
85	22,8	38,6	-68,1	-68,1
90	19,7	31,3	-77,3	-77,3
95	15,4	20,5	-85,9	-85,9
100	11,5	17,2	-88,5	-88,5

Tabela 9.8 – Balanço Energético do Eixo Norte da TRSF



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

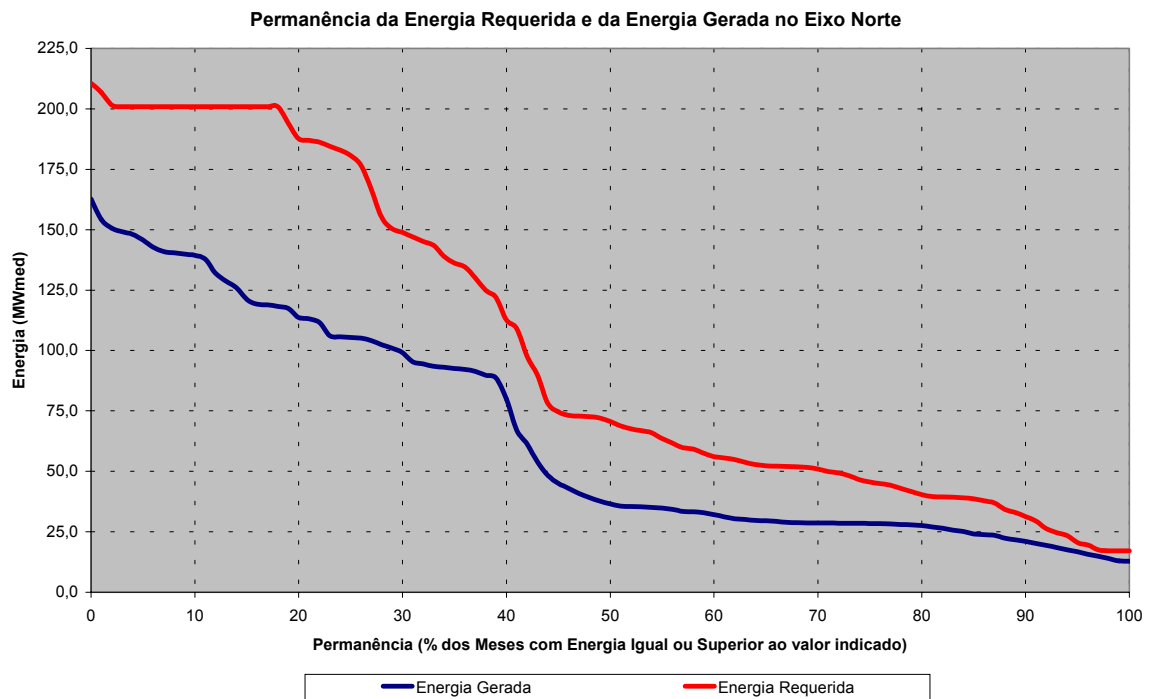


Figura 9.30

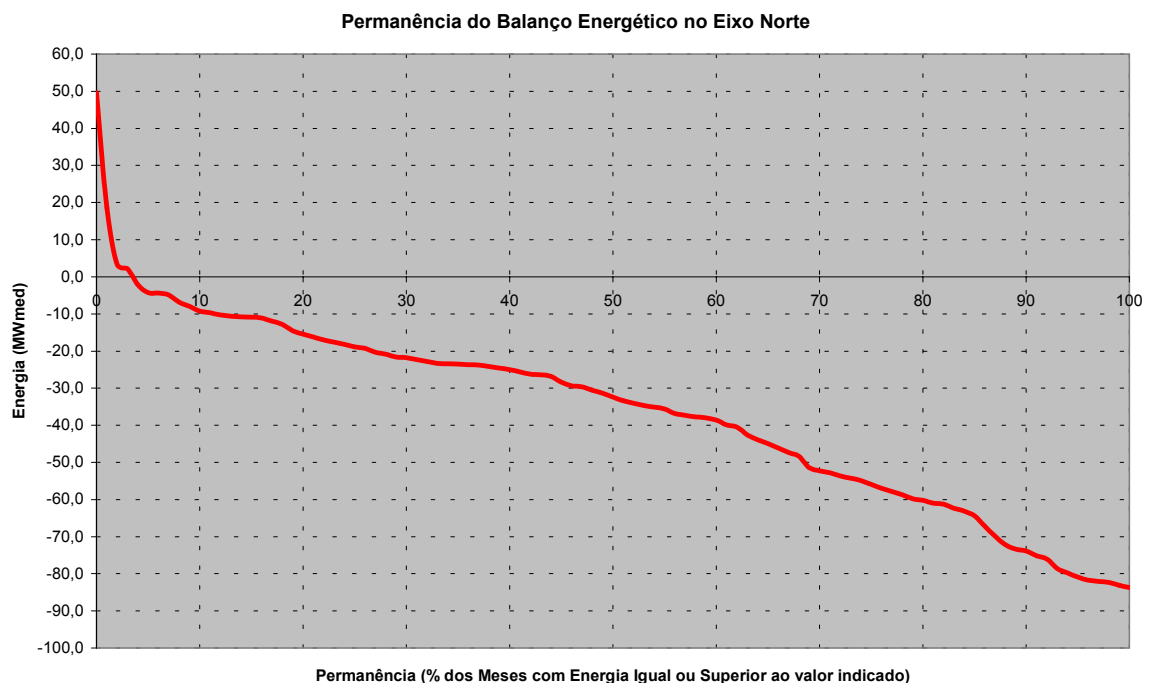


Figura 9.31

10 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos apresentados permitiram obter a produção energética para a potência instalada definida para as usinas hidrelétricas Jati, Atalho, Ávidos I, Ávidos II, São Gonçalo, Salgado I e



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

Salgado II, apresentada na **Tabela 9.6**. A modulação definida garante a geração de 98 a 100 % do potencial energético para o cenário 2.025. Para o cenário denominado atual a geração é inexpressiva para viabilizar a motorização. Já no cenário 2010, atinge-se entre 78 e 89 % do potencial energético, com exceção das usinas hidrelétricas Ávidos I e Ávidos II que ficam limitadas em 43 e 46 %, respectivamente, e do aproveitamento São Gonçalo com geração inexpressiva para motorização.

Os estudos desenvolvidos indicaram uma energia média gerada de 65,4 MWmed, enquanto a energia requerida média no Eixo Norte é de 101,8 MWmed. O balanço energético indica um déficit médio de 36,4 MWmed, podendo chegar a 36,9 MWmed no caso de não haver possibilidade de comercialização do superávit. O máximo déficit chega a 83,7 MWmed, enquanto o superávit máximo chega a 49,7 MWmed. O balanço energético indica, ainda, que em 96 % dos meses o sistema do Eixo Norte estará em déficit. Os resultados do balanço energético são apresentados na **Tabela 9.8**.

Ressalta-se que as demandas do projeto de TRSF poderão apresentar uma dinâmica de evolução, no espaço e no tempo, diversa daquela estabelecida nos cenários. Desta forma, recomenda-se que sejam mantidas revisões periódicas do estudo para adequar as modulações à realidade das demandas do sistema.

Em função das modificações no arranjo do sistema foi desenvolvida uma análise das vazões aduzidas no projeto para o Cenário 2.025. A capacidade requerida para o túnel Cuncas II foi mantida em 83 m³/s, valor consistente com aquele indicado na Tabela 12 do relatório "Reavaliação da **Capacidade Requerida** e da Operação do Sistema de Transposição das Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional", de Fevereiro de 2001. A representação esquemática entre os reservatórios Atalho e Caiçara (**Figura 9.2**) indica o balanço hídrico em condições de vazões máximas, confirmando capacidade requerida. É importante perceber que as demandas também terão que seguir o regime de 21/24 h, com pequenos reservatórios de distribuição intra-diária.

Quanto ao limite de adução da TRSF para o Trecho II, deve ser mantida a capacidade de 50 m³/s. O valor máximo de vazão turbinada de 53,45 m³/s em Ávidos I resulta da soma da vazão máxima de 50 m³/s com as afluições naturais. Os canais de adução para a casa de força devem ser dimensionados para a vazão de 53,48 m³/s, para garantir o desempenho previsto para as usinas.

O limite de adução da TRSF para o Trecho III foi definido anteriormente, como 41 m³/s, conforme depreende-se da Tabela 25 do relatório "Reavaliação da Capacidade Requerida e da Operação do Sistema de Transposição das Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional" de fevereiro de 2001. Nesta oportunidade considerou-se esta capacidade hidráulica sem considerar o regime de 21/24 h, uma vez que o reservatório Cuncas poderia armazenar os bombeamentos para descarregar no horário de ponta. Com a mudança da concepção da operação, que prevê bombeamento e geração concomitantes visando a compensação energética e a implantação de usinas no trecho III, não haverá mais o armazenamento no reservatório Cuncas para descarregar no horário de ponta. Assim, a vazão de dimensionamento do Trecho III deverá ser majorada para 45,1 m³/s, resultado da aplicação do coeficiente de 1,1.

Estabelecida a modulação e comparando-a à evolução da potência instalada que é uma função do atendimento da demanda de água, verifica-se que a época de instalação de cada máquina é a apresentada no **Gráfico 10.1**, que resulta na **Tabela 10.1** que sugere as datas de motorização em cada usina. As hipóteses que geraram essas datas são:

- Data de início dos estudos de demandas, 2.000;
- Data de início das obras, 2.004;
- Data de entrada em operação, 2.007.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

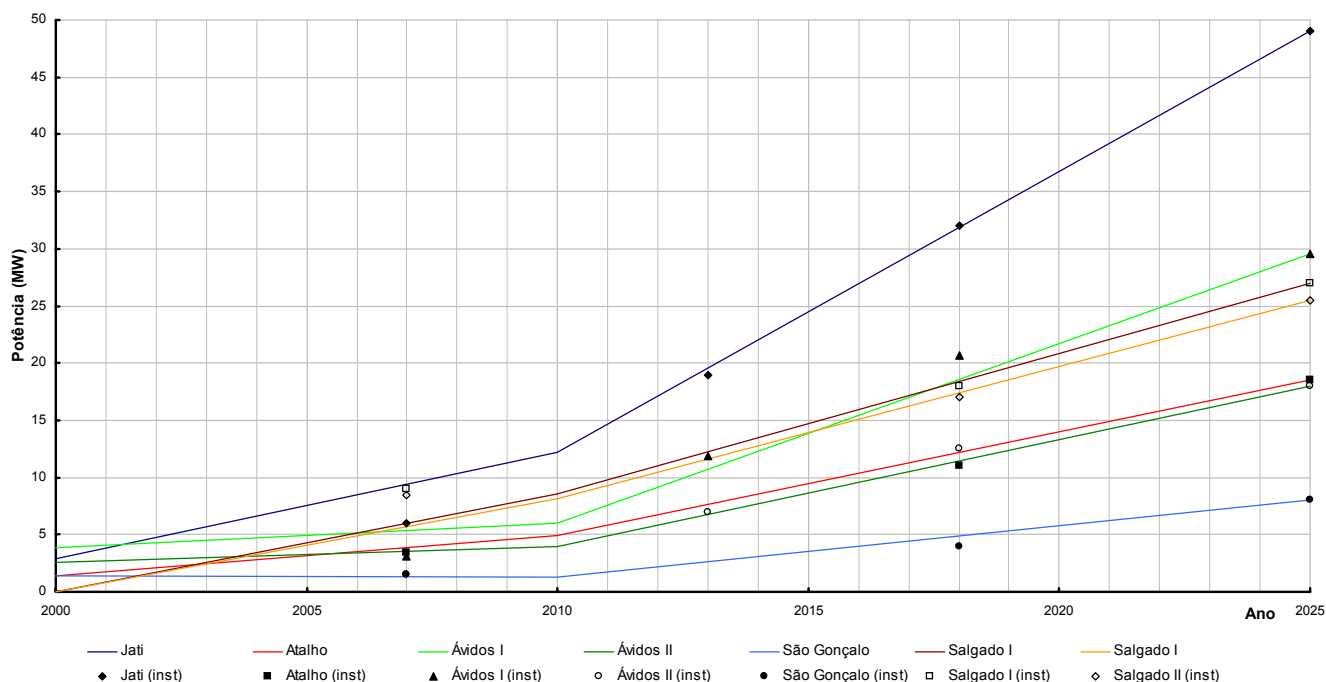


Gráfico 10.1 – Evolução das potências instaladas

Usina	Ano							
	2007		2013		2018		2025	
	Número	Potência	Número	Potência	Número	Potência	Número	Potência
Jati	1	6,0	1	13,0	1	13,0	1	17,0
Atalho	1	3,4	-	-	1	7,55	1	7,55
Ávidos I	1	3,1	1	8,8	1	8,8	1	8,8
Ávidos II	1	1,5	1	5,5	1	5,5	1	5,5
São Gonçalo	1	1,5	-	-	1	2,5	1	4,0
Salgado I	1	3,0	-	-	1	9,0	1	9,0
	1	6,0						
Salgado II	1	3,0	-	-	1	8,5	1	8,5
	1	5,5						

Tabela 10.1 – Cronograma de entrada em operação dos grupos turbo-geradores

11 . REFERÊNCIAS

- Chuvas de 1 hora – Fernández, P.C. et alli “Regional Analysis of Convective Storms”, JHE, Vol.4, nº4, Outubro, 1999 – ASCE.
- Chuvas de 6 horas “Hydrology”, Suppl. A to Sec. 4, Engineering Handbook, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1968.
- Chuvas de 48 horas – “Flood Studies Report”, 1975
- Cunnance, C. Unbiased plotting positions – a review. Journakl of Hydrology, 37, 1978.
- Grabber, S.D. “Relations between Rational and SCS Runoff Coefficients and Methods”, in B.C. Yen, ed. Channel Flow and Catchment Runoof, Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, Va., 1989.



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

- Grubbs, F. and Beck, G. Extension of sample size and performance points for significance testes of outlying observations. *Technometrics*, 14(4)1972.
- HEC-1, Flood Hydrograph Package, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps Engineers, September, 1990.
- Huff, F.A “Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms”, *Water Resources Research*, 1977
- Kirpich, Z.P. “Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds”, *Civ. Eng.*, ASCE, vol. 10, 1940.
- “National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Supplement ‘A’ – Hydrology Guide for use in watershed planning, Washington, D.C., 1975”.
- Pfafstetter, O *Chuvas Intensas no Brasil*, 2ª Edição, Rio de Janeiro, DNOS, 1982.
- Schwab, G.º, Frevert, R.K., and Edminister, T.W. “Elementary soil and water engineering”, John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y., 1966.